

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Máster

**Sistema de medida para la caracterización
del canal MIMO masivo en comunicaciones
5G**

**(Measurement system for the characterization of the
massive MIMO channel in 5G communications)**

Para acceder al Título de

**Máster Universitario en
Ingeniería de Telecomunicación**

Autor: Raichanny de la Nuez Diaz

Septiembre - 2021

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

CALIFICACIÓN DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER

Realizado por: Raichanny de la Nuez Diaz

Director del TFM: Jesús Ramón Pérez

Título: “Sistema de medida para la caracterización del canal MIMO masivo en comunicaciones 5G”

Title: “Measurement system for the characterization of the massive MIMO channel in 5G communications”

Presentado a examen el día:

para acceder al Título de

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre): Rafael Torres Jiménez

Secretario (Apellidos, Nombre): Amparo Herrera Guardado

Vocal (Apellidos, Nombre): Mercedes Granda Miguel

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de:

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

Fdo.: El Director del TFM
(sólo si es distinto del Secretario)

Vº Bº del Subdirector

Trabajo Fin de Máster Nº
(a asignar por Secretaría)

Agradecimientos

No quisiera salir del ámbito académico de la Universidad sin agradecer a los tantos y tantos profesores que nunca se dieron por vencidos y que nos han guiado a ser los futuros profesionales que seremos en el mañana, y en especial quiero agradecer a mi tutor de este trabajo Jesús, que desde el primer al último minuto, se centró en este trabajo a pesar de todas las adversidades que se nos ha presentado en este terrible año, y me ayudó y guió en todos los aspectos del trabajo.

Estos años de pandemia nos han abierto puertas, pero también no las han cerrado, y es por esto que también me gustaría agradecer a todos mis compañeros que más que compañeros ya son como hermanos, que estuvieron ahí siempre, codo a codo luchando contra las adversidades todos juntos, Dani, Laura y Juan, gracias. Y no solo a mis compañeros de clase sino también a mis amigos que, aunque no os nombraré, también me habéis dado fuerzas para seguir adelante todo este tiempo.

Cómo olvidar a los pilares que me dieron la vida, me dieron todo lo que tengo y gracias a ellos soy todo lo que soy, mil gracias a mis padres y a mi familia más cercana. A todos vosotros os dedico las siguientes líneas...

Índice de contenido

Capítulo 1:	INTRODUCCIÓN	6
1.1	CONTEXTO	6
1.2	Importancia del espectro radio eléctrico	9
1.3	Necesidades de espectro para sistemas 5G	10
1.3.1	Soluciones técnicas	11
1.3.2	Compartición del espectro	11
1.4	OBJETIVOS	13
1.5	ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	14
	REFERENCIAS	15
Capítulo 2:	CARACTERIZACIÓN DEL CANAL RADIO: CAPACIDAD Y EFICIENCIA ESPECTRAL	16
2.1	INTRODUCCIÓN	16
2.2	CARACTERIZACIÓN EN BANDA ANCHA DEL CANAL	17
2.2.1	Pérdidas de propagación	18
2.2.2	Perfil potencia retardo	19
2.2.3	Capacidad del canal radio	21
2.2.4	Eficiencia espectral	23
2.3	MIMO MASIVO	24
	REFERENCIAS	29
Capítulo 3:	SONDA DE MEDIDA DEL CANAL RADIO	31
3.1	ELEMENTOS DEL SISTEMA DE MEDIDA	32
3.2	DESCRIPCIÓN DE LA APLICACIÓN	34
3.2.1	Menú principal	35
3.2.2	C-mMIMO	37
3.2.3	Configuración E8362A	41
3.2.4	Configuración P5006A	43
3.2.5	D-mMIMO	44
3.3	ESQUEMA DESCRIPTIVO DE LA APLICACIÓN	45
3.4	CONTRIBUCIONES A LA APLICACIÓN ORIGINAL	46
Capítulo 4:	RESULTADOS: MEDIDAS CON LA Sonda DE CANAL	50
4.1	Contexto	50

4.2	Disposición del entorno de medida INDOOR	51
4.3	Características de los elementos radiantes	54
4.4	Parámetros de las medidas	56
4.5	RESULTADOS: LOS.....	57
4.5.1	Perfil potencia retardo y estadísticos asociados.....	58
4.5.2	Análisis de la capacidad de canal.....	62
4.5.3	Eficiencia espectral	65
4.6	RESULTADOS: NLOS	67
4.6.1	Perfil potencia retardo (PDP) y estadísticos asociados en NLOS.....	67
4.6.2	Capacidad del canal	70
4.7	CONCLUSIONES.....	72
	REFERENCIAS	72
 Capítulo 5: CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....		73
5.1	Conclusiones	73
5.2	Líneas futuras.....	74
 Anexos		77
Anexo 1: Funciones en la que se establece comunicación con el VNA P5006A para la obtención de los Calset y representación		77
REFERENCIAS		80

Capítulo 1: INTRODUCCIÓN

1.1 CONTEXTO

Desde los inicios de las comunicaciones vía radio en el mundo, estas han ido cambiando de acuerdo con las necesidades de la población, conllevando a nuevas formas de evolución de las telecomunicaciones que generan cambios en los actuales paradigmas. Por consiguiente, se han ido desarrollando paralelamente innovaciones tanto del hardware como del software de los componentes que intervienen en este tipo de tecnologías.

En este sentido, es necesario conocer que a lo largo de los años estos grandes cambios en las plataformas de comunicaciones han ido incrementando abruptamente el tráfico en las redes interconectadas, considerando una alta demanda en la versatilidad, escalabilidad y adaptabilidad de los mismos. Por todo ello, habrá mayor cantidad de dispositivos conectados, mayor latencia y alto consumo de las baterías, aspectos que influyen directamente en el marco tecnológico, ya que de no aplicarse soluciones técnicas a estos desajustes puede llevar a crear una inestabilidad en las comunicaciones e incluso verse comprometida toda la arquitectura de este tipo de redes y, por lo tanto, se proponen nuevos desafíos que permitan mitigar estos riesgos con el objetivo de mejorar la calidad de servicio de los usuarios.

Del mismo modo, es importante conocer que esta tecnología engloba a lo que se conoce en la literatura como "Internet de las Cosas" (IoT), basada en las comunicaciones de quinta generación o 5G, diseñada para encontrar configuraciones más avanzadas y complejas, que sirvan para establecer un mejor rendimiento en los requerimientos de la sociedad, presentando una nueva forma tanto en el pensamiento como los componentes que la conforman. La tecnología 5G provee acceso ilimitado a la información, así como disponibilidad de compartirla en cualquier parte, a cualquier hora, por cualquier persona o cosa, para el beneficio de la sociedad.

Gobiernos de los países de la Unión Europea como Alemania, Inglaterra, empresas de tecnología como Samsung Electronics, NTTD, Alcatel o Nokia, entre otras, han realizado grandes inversiones en pruebas de laboratorio para obtener datos claves que sirvan de aporte para poner en práctica esta tecnología. En este orden de ideas, se establecieron alianzas estratégicas entre operadoras telefónicas, empresas de telecomunicaciones y universidades de diversos países, con la finalidad de favorecer el intercambio de información en base a los

resultados obtenidos, en las pruebas tanto de hardware como software. Entre algunos proyectos asociados con esta idea se encuentran NGMN Alliance, iJOIN, Mobile Cloud Networking, 5GNOW, y uno de los más destacados es METIS2020 (Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty information Society).

Las organizaciones mencionadas enfatizan la importancia de cumplir con los desafíos establecidos, como es el caso de la duración de la batería de los dispositivos, velocidad en la transmisión de los datos, una menor latencia, la cantidad de dispositivos conectados, el alto volumen de datos móviles; por medio de la creación de nuevos mecanismos que ayuden a solventar estos retos [1]. El nivel de rendimiento estimado para estas tecnologías de quinta generación será que el volumen del tráfico sea 1000 veces mayor al actual, soportando 10 billones de dispositivos conectados, con un incremento de 10 a 100 veces en las tasas alcanzables de datos de los usuarios, una reducción en la latencia de las redes en un factor de hasta cinco veces al actual, promoviendo la integridad de los datos, incrementando en hasta 10 veces la vida de la batería de los dispositivos, respondiendo básicamente a los hitos que se muestran en la Figura 1.1.

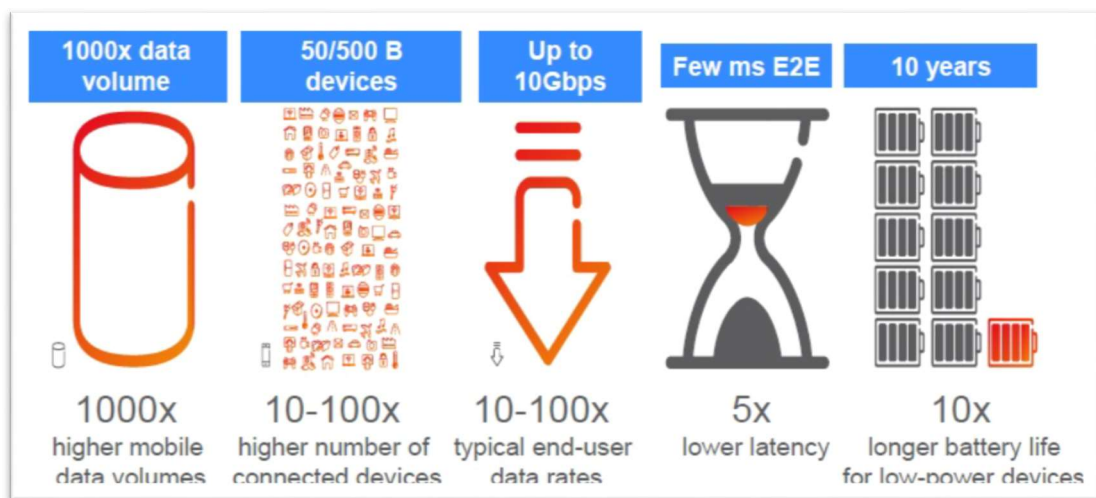


Figura 1.1 Retos que se plantean para la tecnología 5G

Por otro lado, los problemas desde la perspectiva de los usuarios finales se presentan en los siguientes escenarios [2]:

- redes en movimiento
- redes ultradensas
- comunicación de dispositivos a dispositivos (D2D)
- comunicaciones ultra confiables
- comunicación masiva de máquinas

Para obtener soluciones técnicas que puedan solucionar estos retos se plantea optimizar todos los aspectos relacionados con los conceptos de radio enlace, soluciones MIMO, red de múltiples capas, espectro y el entorno radio que será la base de este estudio, tal y como se puede observar en la Figura 1.2.

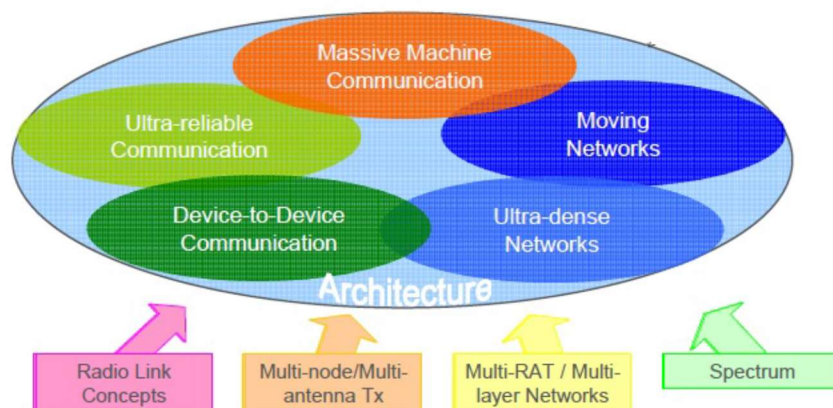


Figura 1.2 Escenarios de uso y bases para establecer la arquitectura de las redes de quinta generación móvil 5G

Se requieren muchos pasos para lograr alcanzar la visión del futuro que se ha ido contemplando; que va desde un punto de vista general hasta la perspectiva del usuario final. Sin embargo, después de cinco años desde que se introdujo esta visión, se están comenzando a presenciar algunos aspectos de la misma, ya sea como algunos servicios en la vida cotidiana en países desarrollados o como en la inversión en investigación en todo el mundo.

Por otra parte, se espera que las comunicaciones 5G estén caracterizadas por numerosos dispositivos y redes interconectadas, y que se incremente en varios órdenes de magnitud el tráfico de datos. Entre las soluciones teóricas más incipientes juegan un papel destacado las redes heterogéneas, con el uso de celdas de varios tamaños y puntos de acceso con diferentes propiedades y tecnologías necesarias con el fin de cumplir con los requisitos de 5G, para aumentar la capacidad y rendimiento con un retardo reducido.

Por consiguiente, los anteriormente citados representan los principales problemas a los que se enfrentará esta tecnología. Primeramente, las redes en movimiento (MN) [3], suponen un cambio de paradigma, ya que un nodo (dispositivo móvil, vehículo u otro) o un grupo de nodos que pueden formar una red móvil que se comunica con su entorno servirán como fuente de comunicación a otros dispositivos que se encuentren a su alrededor, con la finalidad de mejorar

y ampliar potencialmente la cobertura en grandes poblaciones, manteniendo la calidad de servicio a los usuarios finales, como se ilustra en la Figura 1.3.

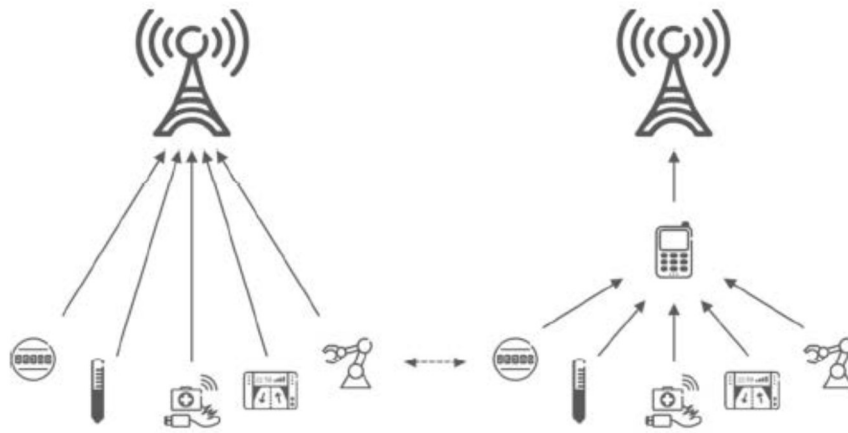


Figura 1.3 Esquema representativo de las redes en movimiento, o MN según el acrónimo anglosajón

1.2 Importancia del espectro radio eléctrico

Las comunicaciones móviles 2G/3G/4G vigentes en la actualidad, utilizan principalmente asignaciones de frecuencia en el rango de las microondas (ver Figura 1.4) y, en concreto entre 700 MHz y 42 GHz. Además, algunas comunicaciones tienen lugar en el rango de 400 MHz y 70/80 GHz; sin embargo, el uso de este conjunto de frecuencias es relativamente muy pequeño. Las frecuencias son asignadas por el Sector de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU-R) a través de las Conferencias Mundiales de Radiocomunicaciones (CMR) tanto a nivel primario como secundario.

En el marco de los sistemas 5G se prevé el uso de aplicaciones y servicios de banda ancha de alta capacidad que requerirán una gran cantidad de espectro. Más allá de la banda ancha móvil excesiva y los gigabits de velocidades de datos, aplicaciones como el IoT, el uso de sensores inalámbricos, etc., han requerido la búsqueda de espectro adicional. Está ampliamente establecido que el mundo necesitará aproximadamente 1000 MHz adicionales para satisfacer las demandas de banda ancha móvil para 2021. La escasez de espectro se está convirtiendo en uno de los problemas clave para la implantación y la expansión de las redes con tecnología 5G, y hasta ahora no se ha encontrado una solución universal.

La ITU a través de la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones 2015 (CMR-15) solo asignó 51 MHz para IMT (Telecomunicaciones Móviles Internacionales) a escala global, lo que es bastante infinitesimal en comparación

con lo que se requiere. Sin embargo, en el marco de la conferencia se han identificado varias bandas en el rango de 24,26–86 GHz para que los estudios aborden este requisito. Se espera que los estudios de compartición y compatibilidad de estas bandas se apliquen, ya que han sido postulados durante la CMR-19; por lo tanto, podemos esperar encontrar espectro adicional para 5G siendo este uno de los objetivos de estudio de este documento. En este sentido, la CMR del año 2023 debe arrojar resultados claros en cuanto a las nuevas dotaciones de espectro para los sistemas de comunicaciones móviles terrestres.

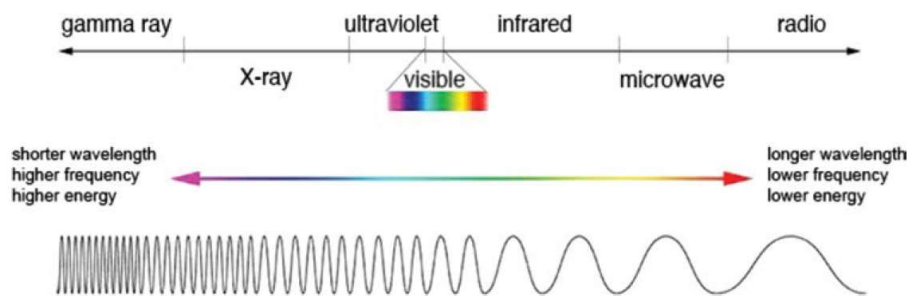


Figura 1.4 Espectro electromagnético

1.3 Necesidades de espectro para sistemas 5G

Es bien sabido que la disponibilidad de nuevas bandas de espectro es un requisito clave para la prestación de servicios 5G o IMT-2020. La ITU-R ha estimado que las necesidades totales de espectro mundial para las IMT estarán comprendidas entre 1340 (para configuraciones de menor densidad de usuarios) y 1960 MHz (para configuraciones de mayor densidad de usuarios) para el año 2021 [4].

La atribución del espectro se requiere no sólo en la interfaz aérea, sino también para el backhaul y, hasta cierto punto, en el fronthaul. Fronthaul es el enlace entre un grupo de unidades de banda base y unidades radioeléctricas remotas (RDU) que colectivamente forman el concepto de C-RAN (cloud/centralized radio access network). Backhaul (primera etapa entre RRUs que no son más que las unidades de radio remotas, y el Core Network) es un desafío importante para 5G, pero, hasta cierto punto, se puede cubrir con medios cableados como el cable de fibra óptica y tecnologías como la línea de suscriptor digital de muy alta velocidad, y así sucesivamente. Sin embargo, en su mayor parte, la interfaz aérea (enlace entre el usuario/dispositivo inalámbrico y la unidad de radio remota) es donde se requiere la gran mayoría del espectro.

Casi todas las bandas de frecuencias, en particular hasta 100 GHz, se utilizan ampliamente y está bien establecido que el sector necesitará entre 1000 y 2000 MHz adicionales para 2021. Teniendo presente este desafío, la CMR-15, identificó unos pocos cientos de megahercios de espectro para banda ancha móvil a nivel regional. Sin embargo, a nivel mundial, la CMR-15 sólo pudo identificar 51 MHz para las IMT. El espectro se asignó para garantizar la armonización a nivel regional y mundial. La armonización reducirá los precios de producción de equipos móviles de banda ancha y, por lo tanto, ayudará a ofrecer una banda ancha más asequible para todos.

1.3.1 Soluciones técnicas

Esta sección discutirá brevemente algunas soluciones que potencialmente podrían abrir puertas para dotar de más recursos frecuenciales a los sistemas de quinta generación. La compartición del espectro encabeza la lista, mientras que los avances en semiconductores, tecnología de antenas y técnicas de prevención de interferencias brindarán oportunidades para sacar aún más rendimiento al espectro asignado existente.

1.3.2 Compartición del espectro

La compartición del espectro se define como el uso colectivo de una banda de frecuencias por dos o más partes en una zona geográfica específica. El intercambio puede tener lugar tanto en bandas con licencia como exentas de licencia [5]. Para el 5G también puede ser necesario considerar la posibilidad de compartir con operadores tradicionales, como el SFS (servicio fijo por satélite), el radar, etc. En estos casos se requieren estudios de compatibilidad entre servicios. En la **Tabla 1.1** se expone un ejemplo de las principales bandas potenciales para los servicios de IMT.

La compartición del espectro es un desafío tridimensional que no sólo debe tener en cuenta la frecuencia, sino que también debe abarcar factores geográficos y de tiempo para proporcionar acceso a múltiples clases de usuarios, con uno o más tipos de tráfico activos.

El mecanismo de acceso compartido con licencia (LSA) permite a los licenciatarios de LSA acceder al espectro que ya se ha asignado a un titular. Este método permite compartir el espectro en base a ciertas reglas que garantizan un determinado nivel de QoS (Calidad de Servicio).

Tabla 1.1 Bandas potenciales para los servicios de IMT [6]

Potential Bands for Future IMT Services		
Band (GHz)	Bandwidth (GHz)	Key Current Allocation Service
24.25–27.5	3.25	FIXED, FIXED-SATELLITE, EARTH EXPLORATION-SATELLITE, MOBILE, INTER-SATELLITE
31.8–33.4	1.6	FIXED, INTER-SATELLITE, SPACE RESEARCH, RADIONAVIGATION
37–40.5	3.5	FIXED, FIXED-SATELLITE, SPACE RESEARCH, MOBILE, MOBILE-SATELLITE
40.5–43.5	3	FIXED, FIXED-SATELLITE, BROADCASTING, BROADCASTING-SATELLITE
45.5–50.2	4.7	FIXED, FIXED-SATELLITE, MOBILE
50.4–52.6	2.2	FIXED, FIXED-SATELLITE
66–76	10	FIXED, FIXED-SATELLITE, BROADCASTING-SATELLITE, MOBILE, MOBILE-SATELLITE, RADIONAVIGATION, RADIONAVIGATION-SATELLITE
81–86	5	FIXED, FIXED-SATELLITE

LSA permite a los operadores móviles utilizar/obtener espectro adicional sobre una base secundaria y con acceso garantizado para una zona geográfica, un marco de tiempo y una gama de frecuencias acordados. Además, la compartición con licencia puede ser horizontal, lo que normalmente implica la compartición entre dos partes similares (como dos operadores móviles), mientras que, con la compartición vertical, la frecuencia puede compartirse entre diferentes tipos de partes (como los operadores móviles y una organización gubernamental) [7]. Todas estas opciones de compartición con licencia pueden tener lugar dentro de una zona especificada (compartición geográfica), en momentos específicos o aleatorios (compartición temporal), y también deben coordinarse para evitar interferencias perjudiciales [8]. El enfoque de exención de licencia, como su nombre indica, permite compartir entre las partes sin necesidad de una licencia. Permite el mejor esfuerzo de acceso y operaciones para la descarga de datos y así

sucesivamente, y por lo tanto no es adecuado para el rendimiento de grado de portadora.

El valor del espectro depende de la rentabilidad de los servicios que han sido asignados al mismo. Por ejemplo, el espectro asignado a las telecomunicaciones móviles producirá un valor económico mucho mayor que el que se ha asignado a una entidad gubernamental. Compartir implica compensaciones por las cuales permitir que un nuevo usuario en la banda probablemente disminuirá lo que un suscriptor existente puede hacer y capitalizar. En términos generales, la compartición del espectro crea costes y restringe los ingresos en comparación con el uso exclusivo de la misma banda de frecuencias [8]. Se dispone de muchos estudios de casos que han determinado el impacto de la compartición en el valor del espectro.

Para mejorar la eficiencia espectral con respecto de los actuales sistemas LTE/LTE-Advanced, los avances en el diseño de semiconductores y la tecnología de antenas son cruciales. Las bandas que se han identificado para los estudios de servicios 5G/banda ancha se encuentran principalmente en el rango de ondas milimétricas (es decir, 24,25–86 GHz). En esta gama particular de frecuencias, hay una pérdida adicional del trayecto de 20–30 dB en comparación con las frecuencias de 2 GHz; sin embargo, esto se puede compensar utilizando matrices de antenas en fase a gran escala. Estos arreglos en fase a gran escala son factibles a frecuencias más altas ya que, a medida que la frecuencia se hace más alta, el tamaño de la antena disminuye. Un concepto similar de MIMO masivo (Multiple Input Multiple Output) que suscribe el uso de múltiples antenas tanto en el extremo transmisor como en el receptor ha sido ampliamente discutido en la literatura para aumentar la capacidad y la eficiencia espectral para 5G.

En cuanto a los avances en semiconductores, las soluciones altamente integradas de circuito integrado de radiofrecuencia (RFIC) y MMIC (circuito integrado de microondas monolíticas) son deseables para satisfacer las necesidades de tamaño, costo y consumo de energía de los productos de radio de onda milimétrica de banda ancha de gama alta. Un buen ejemplo es la disponibilidad de MMIC para productos de radio de microondas que funcionan en el rango de 70/80 GHz. Sin embargo, existen desafíos y se está trabajando para resolverlos.

1.4 OBJETIVOS

El objetivo de este Trabajo Fin de Máster (TFM) es contribuir a la caracterización de canales MIMO masivo en entornos de interiores apoyándose

en la mejora de una plataforma de medida de sistemas MIMO masivo concentrado y distribuido, y centrando el estudio en la banda de los 26 GHz (24.25-27.5 GHz), banda aún sin explorar por el grupo investigador receptor. Con ello se pretende ver cómo se comporta el canal radio para las comunicaciones 5G o futuras generaciones de sistemas de comunicaciones móviles en interiores. Primeramente, el trabajo se centrará en una mejora del software del sistema de medida del grupo de investigación dando la posibilidad de conectarse a un analizador de redes que sea capaz de alcanzar frecuencias más altas, en este caso los 26 GHz. Una vez realizada la puesta a punto del sistema automatizado de medida del canal radio, se pretende analizar el canal radio con pruebas de laboratorio en un escenario de interior de referencia, testeando el sistema de medida y contribuyendo con los resultados obtenidos al análisis y a la caracterización del canal radio.

1.5 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

Este documento se organiza en cinco capítulos diferenciados, siendo este capítulo introductorio el primero de ellos, en el que se ha introducido al lector a la tecnología 5G, ilustrando la importancia que tiene la caracterización del canal radio en la planificación de los sistemas.

En el siguiente capítulo se abordará la caracterización del canal radio, centrándonos en el MIMO masivo y sus parámetros de interés para el enlace ascendente, ahondando en conceptos de capacidad de canal y eficiencia espectral.

Posteriormente, en el capítulo 3, se explicarán los cambios y las mejoras realizadas sobre la plataforma de medida utilizada como punto de partida en este TFM. Además, se expondrá cómo se ha realizado la campaña de medidas y todas las consideraciones tenidas en cuenta.

En el capítulo 4 se expondrán los resultados experimentales obtenidos y se realizará un análisis de los mismos, prestando especial atención a los valores de capacidad y eficiencia espectral del canal radio.

Para finalizar, en el capítulo 5 se hará un resumen de todo lo que se ha expuesto anteriormente, con las principales conclusiones y las futuras líneas de investigación que pueden seguirse para dar continuidad al trabajo realizado.

REFERENCIAS

- [1] METIS, « “Final report on architecture,» 2015. [En línea]. Available: https://www.metis2020.com/wp-content/uploads/deliverables/METIS_D6.4_v2.pdf. [Último acceso: 2021 junio 02].
- [2] A. Osseiran, «Challenges and Scenarios of the fifth Generation (5G) Wireless Communications System,» 2013. [En línea]. Available: https://metis2020.com/wp-content/uploads/presentations/W@kth_METIS_overview_scenarios_20131115_web.pdf. [Último acceso: 03 junio 2021].
- [3] H. L. Z. H. A. F. P. G.-S. D. P. K. P. M. G. B. O. Tullberg, «Towards the METIS 5G Concept. First view on Horizontal Topics Concepts,» *IEEE Communications Society*, pp. 1-5, 2014.
- [4] ITU-R, « Report of the Conference Preparatory Meeting on Operational and Regulatory/Procedural Matters to the World Radiocommunication Conference,» 2015.
- [5] G. b. D. a. R. Wireless., «The Impact of Licensed Shared Use of Spectrum,» 2014.
- [6] Americas, «Mobile Broadband Transformation LTE to 5G,» *Rysavy Research, LLC; ITU-R*, Vols. %1 de %2Final Acts WRC-12 World Radiocommunication Conference 2012; ITU-R 2008. Final Acts WRC-07 World Radiocommunication Conference 2007; ITU-R 2000. Final Acts WRC-2000, 2016.
- [7] L. Moore, «Spectrum Policy in the Age of Broadband: Issues for Congress,» Washington, DC, USA., 2013.
- [8] C. a. M. G. S. S. T. a. E. Bazelon, Spectrum Sharing Taxonomy and Economics., The Brattle Group., 2014.

Capítulo 2: CARACTERIZACIÓN DEL CANAL RADIO: CAPACIDAD Y EFICIENCIA ESPECTRAL

2.1 INTRODUCCIÓN

A diferencia de los medios de transmisión guiados, el canal radio móvil es un medio altamente reflectivo y dispersivo y, por tanto, es un medio complejo que influye en la propagación radioeléctrica y cuya caracterización juega un papel muy importante en la planificación de los sistemas de comunicaciones móviles. Su estudio es fundamental para generar simulaciones, pronósticos, mapas de cobertura y poder hacer comparaciones de sistemas de comunicaciones. Existen distintos modelos para poder caracterizar un canal de estas características, modelos deterministas y modelos estadísticos. Este documento se centrará en el estudio de los modelos estadísticos ya que se asemejan más a la realidad del medio. Los modelos estadísticos vienen dados por la caracterización de la señal en pequeña escala (tiempo, frecuencia, distancia...), variaciones por debajo de un umbral mínimo, y se suele emplear una respuesta al impulso dada por una variable aleatoria que depende del tiempo.

Este tipo de modelos dependen de la línea de vista (LOS), es decir, cuando existe una componente principal frente a los siguientes ecos que llegan al receptor, o también de modelos sin línea de vista (NLOS), es decir, cuando no existe una componente principal, y además también dependerá del tipo de desvanecimientos (fast fading, slow fading) que alcanzan a la señal enviada.

El canal radio en comunicaciones móviles terrestres es un medio dispersivo, con el añadido de la variación temporal asociada principalmente con los cambios de posición relativa entre transmisor y receptor. En línea con lo expuesto en este tipo de comunicaciones, la disposición de los usuarios, las propiedades de los elementos que componen el medio de propagación, hacen que un medio que no es guiado experimente un cambio constante que hace que el canal no sea determinista y que haya que recurrir a su caracterización estadística.

Caracterizar el canal implica evaluar el comportamiento de la comunicación frente a múltiples escenarios y factores, de forma que el futuro despliegue de redes y estaciones base se efectúe garantizando su máxima utilidad. El desarrollo tecnológico hacia la 5G implica nuevos requisitos para los que llevar a cabo el análisis y sus consiguientes medidas del canal respecto a los modelos de generaciones pasadas, los cuales se ajustan a bandas de frecuencia por debajo de

los 6 GHz pero que, con las nuevas actualizaciones de asignaciones y estudios de nuevas frecuencias, se realizan nuevos estudios como éste en el que se plantean medidas de canal a frecuencias superiores.

Algunas de las mejoras que se introducen en las nuevas redes están ligadas a la exploración del canal en tres dimensiones, cuyo objetivo es el de ampliar el marco de investigación y desarrollo de las técnicas MIMO (acrónimo en inglés de Multiple-Input Multiple-Output y en español, múltiples entradas, múltiples salidas) y otras técnicas como beamforming. También se han desarrollado avances respecto al trabajo con arrays de gran tamaño, la consistencia espacial lograda a partir de la interrelación entre los ángulos de salida y llegada, y la definición de las regiones de visibilidad, son algunas de las mejoras que se han alcanzado desde versiones iniciales como es el SCM (modelo de canal espacial) del 3GPP (Proyecto Asociación de Tercera Generación) basado en el 3D GSCMs . El objetivo por perseguir se refleja en contribuciones como las de los proyectos WINNER o mmMAGIC [1] [2], impulsando la estandarización del canal 5G y su adaptación a modelos anteriores. Actualmente ya se han presentado propuestas de sistemas radio que cumplen los requisitos expuestos por la IMT-2020. Un ejemplo, cuya verificación se puede corroborar en [3], muestra una comparativa de los resultados arrojados por la simulación del proyecto 5G NR de 3GPP frente a los resultados obtenidos por empresas como Huawei, Ericsson o Intel.

2.2 CARACTERIZACIÓN EN BANDA ANCHA DEL CANAL

La caracterización experimental del canal radio implica procesar la información de las medidas de canal para, a partir de sus figuras de mérito, poder extraer conclusiones sobre el escenario en cuestión o modelos empíricos que permitan contribuir al análisis del canal en los entornos de estudio. Entre las figuras de mérito que podemos destacar se encuentran las pérdidas de propagación del canal, a partir de las cuales se puede definir un modelo de pérdidas del canal. Además, por ejemplo, a partir de la respuesta impulsiva del canal se puede evaluar el perfil potencia retardo (PDP) y se pueden extraer conclusiones importantes sobre la dispersión temporal o el ancho de banda de coherencia, parámetros que han cobrado relevancia en la definición de los sistemas basados en MIMO masivo. Otros aspectos relevantes en la planificación de los nuevos sistemas son la capacidad y la eficiencia espectral del canal radio. En las siguientes subsecciones se procederá a describir brevemente cada uno de estos parámetros.

2.2.1 Pérdidas de propagación

Las pérdidas de propagación se definen como la atenuación de la densidad de potencia de una onda electromagnética en su interacción con el medio durante la comunicación. En su nivel de menor complejidad, se asocian con las pérdidas en espacio libre (2.1), correspondientes al vacío, y donde puede observarse su dependencia con la distancia y con la frecuencia a través de la longitud de onda [4]. Obsérvese que con una ligera conversión a términos lineales esta pérdida aumenta cuadráticamente con la frecuencia y con la distancia, esto supone un problema para trabajar con frecuencias muy altas como es el caso de estudio. Sin embargo, debido al multicamino, el modelo de pérdidas en espacio libre no es aplicable al entorno indoor.

$$L_{bf} = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) = 32.4 + 20 \log(d(km)) + 20 \log(f(MHz)) \text{ [dB]} \quad (2.1)$$

Analizar este parámetro adquiere mayor importancia en comunicaciones móviles en las situaciones en las que el ancho de banda de la señal supera al de coherencia, por lo que se debe evaluar la selectividad en frecuencia del canal. El teorema de Parseval es utilizado para obtener las pérdidas en el dominio de la frecuencia con respecto a las situaciones de UWB (banda ultra ancha), mediante la fórmula de Friis generalizada [5].

$$PG = \frac{P_r}{P_t} = \sum_{n=0}^{N-1} |h[n]|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |H[k]|^2 \quad (2.2)$$

En (2.2) se muestra la ganancia de propagación, que relaciona las potencias recibida y transmitida, P_r y P_t respectivamente; h representa la respuesta impulsiva del canal con N muestras. Si el canal se caracteriza de forma experimental y se mide la función de transferencia compleja del mismo para una disposición concreta de transmisor y receptor, utilizando por ejemplo un analizador de redes (VNA) previamente calibrado en los extremos de los cables de radiofrecuencia, entonces H representa la función de transferencia compleja del canal, muestreada con los N tonos medidos, y que coincidirá con el parámetro de scattering de la medida, S_{21} .

De acuerdo con la disposición de medida comentada en el párrafo anterior, si el VNA se calibra en los extremos de los cables (solo se está midiendo la respuesta del canal y las antenas y no otras alteraciones de desfases o contribuciones),

entonces habrá que corregir H para compensar el efecto de las antenas, de acuerdo a (2.3), y tal que las pérdidas de propagación pueden calcularse según (2.4).

$$H'[k] = \frac{H[k]}{\sqrt{g_t[k]g_r[k]}} = \frac{S_{21}[k]}{\sqrt{g_t[k]g_r[k]}} \quad (2.3)$$

$$PL(dB) = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \frac{|S_{21}[k]|^2}{\sqrt{g_t[k]g_r[k]}} \right) \quad (2.4)$$

2.2.2 Perfil potencia retardo

El perfil potencia retardo, PDP, es un reflejo de la influencia del canal sobre la señal, recogiendo la distribución de la potencia recibida ante la dispersión temporal de las diferentes componentes del multicamino. Las diversas contribuciones a la señal recibida tienen su justificación en el efecto que introduce el multicamino, contribuciones que llegan con diferentes niveles y retardos al receptor. De esta forma y teniendo en consideración el nivel de potencia, se puede hacer una distinción entre el rayo directo, reflexiones de diferente orden, difracciones, e incluso por la combinación de estas dos últimas. El análisis del PDP para una disposición transmisor-receptor permite establecer un rango temporal sobre el que evaluar las fluctuaciones y variabilidad del medio. En definitiva, del PDP puede extraerse información para analizar la dispersión temporal del canal y la selectividad frecuencial, utilizando parámetros como el RMS Delay Spread y el ancho de banda de coherencia, respectivamente.

El RMS Delay Spread es probablemente el parámetro más importante con el que cuantificar la extensión del retardo temporal del multicamino en el canal radio. Se define de acuerdo con (2.5) como la raíz cuadrada del segundo momento central del PDP, el cual se trata como una distribución estadística de la potencia asociada con cada retardo. En (2.5), las expresiones de cálculo del retardo cuadrático medio y del retardo medio del canal vienen dadas por (2.6) y (2.7), respectivamente.

$$\tau_{rms} = \sqrt{\overline{\tau^2} - (\bar{\tau})^2} \quad (2.5)$$

$$\overline{\tau^2} = \frac{\int_{\tau_{min}}^{\tau_{max}} \tau^2 P(\tau) d\tau}{\int_{\tau_{min}}^{\tau_{max}} P(\tau) d\tau} \quad (2.6)$$

$$\bar{\tau} = \frac{\int_{\tau_{min}}^{\tau_{max}} \tau P(\tau) d\tau}{\int_{\tau_{min}}^{\tau_{max}} P(\tau) d\tau} \quad (2.7)$$

El cálculo de este parámetro permite entre otros aspectos evaluar la interferencia intersimbólica (ISI), condicionante de la BER y, en términos generales, de la comunicación. Trabajando en torno a los datos extraídos y en comparación con el tiempo de símbolo y el ancho de banda empleado, se puede definir la situación del enlace, y la necesidad o no de usar ecualización o recurrir a técnicas como la OFDM [6].

En una primera aproximación, un valor de τ_{rms} inferior a la duración de un símbolo, bit o ráfaga, implicará disponer de un canal plano, y por lo tanto evitar la ISI. En la práctica, en transmisiones continuas, este ensanchamiento de la señal transmitida por efecto de las múltiples réplicas del multicamino puede provocar la degradación del sistema a causa de la distorsión y la ISI.

Por otra parte, en el dominio de la frecuencia el análisis de la selectividad frecuencial del canal se enfoca a partir del ancho de banda de coherencia, el cual puede extraerse a partir de la función de correlación con la frecuencia del canal, ligada al PDP y vista como la transformada de Fourier del mismo, de acuerdo a (2.8).

$$R(\Delta f) = \int_{-\infty}^{\infty} P(\tau) e^{-2j\pi\Delta\tau} d\tau \quad (2.8)$$

Analizando la correlación del canal en función de la separación en frecuencia, se establece al ancho de banda de coherencia como el rango de frecuencias en las que el canal mantiene un comportamiento plano. Disponer de un ancho de banda de coherencia mayor que el ancho de banda de la señal a transmitir conlleva evitar la selectividad en frecuencia. Pensando en una aplicación práctica de la formulación, si se mide experimentalmente la función de transferencia compleja del canal debidamente muestreada con N tonos, interesa una representación alternativa a (2.8) como la que se muestra en (2.9) y que representa lo mismo, el cálculo de la función de correlación como la transformada de Fourier del PDP, siendo éste calculado a partir de la respuesta impulsiva del canal, la cual a su vez puede calcularse como la transformada inversa de Fourier de la función de transferencia realmente medida.

$$R_{HH}[q] = \sum_{n=0}^{N=1} |h[n]|^2 e^{-j\frac{2\pi}{N}nq} \quad (2.9)$$

La relación inversa que mantienen ambos dominios, es decir, que existe entre el RMS delay spread y el ancho de banda de coherencia se plasma en (2.10) donde a partir del valor que tome la constante α se obtienen los diferentes grados de correlación típicos que aparecen en la literatura, 50%, 70% y 90%.

$$B_c = \frac{1}{\alpha \tau_{rms}} \quad (2.10)$$

El análisis de las expresiones anteriores concuerda con lo esperado en la práctica: a mayor grado de correlación exigido entre las respuestas en frecuencia del canal, menor será la separación en frecuencia o el rango de frecuencias que lo cumplen, esto es el ancho de banda de coherencia del canal.

Llegados a este punto podemos introducir los bloques de coherencia [7]. Según el modelo de Clarke, dada la expresión del tiempo de coherencia con un nivel de correlación del 70%:

$$T_c = \frac{9\lambda}{16\pi v} \quad (2.11)$$

el número de muestras por bloque es:

$$N_c = B_c T_c \quad (2.12)$$

Para las situaciones en las que las diferencias entre los distintos niveles de correlación sean notables, será necesario seleccionar el porcentaje de correlación adecuado para considerar el canal como plano durante el B_c .

2.2.3 Capacidad del canal radio

La capacidad del canal radio (bits/s/Hz), es la medida de la máxima información que podemos transmitir por él, es decir, de la máxima eficiencia espectral que podríamos obtener, si bien ésta última depende del procesado de señal que utilicemos. La capacidad del canal depende del modelo de fading que se haya tomado del canal (canal constante, ergódico o block fading) así como de

la información de estado del canal que haya disponible entre transmisor y receptor (CSI). De esta forma se puede determinar qué límites regulan la transmisión de datos y bajo qué máximos se trabaja. Partiendo de los límites teóricos expuestos por Shannon para un canal con ruido blanco gaussiano:

$$C(f) = W \cdot \log_2(1 + SNR(f)) \text{ [bps/Hz]} \quad (2.13)$$

Y considerando el enlace ascendente de la comunicación bajo condiciones favorables de propagación, la capacidad asintótica puede calcularse de acuerdo a (2.14), donde K y M representan el número de usuarios activos y el número de antenas de la estación base (BS), respectivamente y W el ancho de banda del canal. Este valor de la capacidad correspondería al caso de tener una interferencia nula entre usuarios simultáneamente activos, lo cual se conseguiría en el límite de una propagación totalmente favorable, donde los radiocanales establecidos entre cada usuario y la BS serían perfectamente ortogonales [8]. Hay que recordar que la teoría de Shannon prueba la existencia de un código que alcanza estas velocidades de datos con menor probabilidad de error, es decir que las codewords han de ser lo suficientemente largas para poder aproximarse a este límite. Las diferencias entre las posibles modulaciones y el límite de Shannon se muestran la **Figura 2.1**.

$$C_T = KW \log_2(1 + \frac{M \cdot SNR}{K}) \quad (2.14)$$

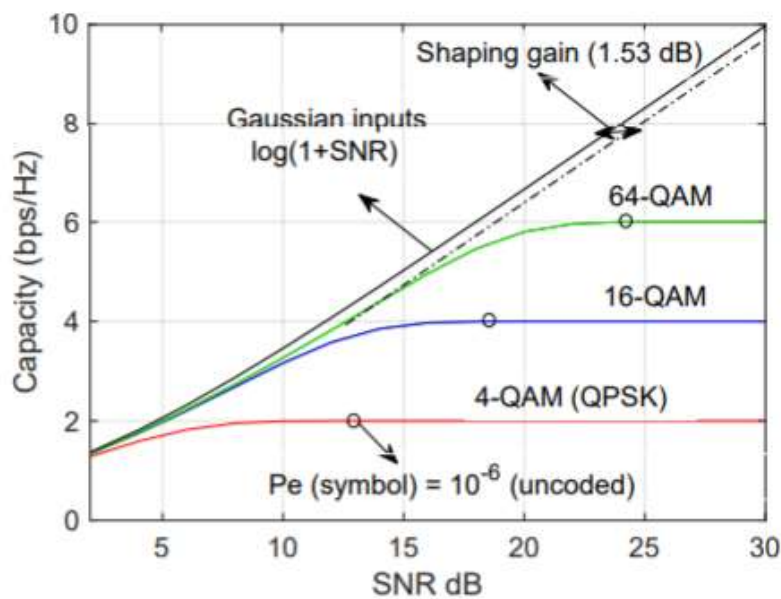


Figura 2.1 Diferencias entre las distintas modulaciones y el límite de Shannon

2.2.4 Eficiencia espectral

El espectro radioeléctrico es un recurso finito, que exige una explotación eficiente por parte de todas las aplicaciones que hacen uso de él. La eficiencia espectral se define como el número medio de bits por unidad de tiempo que pueden ser transmitidos por unidad de ancho de banda (bits/s/Hz). Esto se traduce en la capacidad de un sistema para transmitir sin errores una determinada cantidad de información aprovechando el ancho de banda de un canal dado [9]. Para concluir la explicación del concepto, hay que hacer referencia al apartado anterior. La eficiencia espectral máxima está limitada por la capacidad del canal.

En los siguientes párrafos se plantea el desarrollo teórico para el cálculo de la eficiencia espectral en el enlace ascendente, UL. La representación del canal se almacena en la matriz $H_{M \times K}$ recogiendo por cada columna la respuesta del medio para cada usuario, $h_k (M \times 1)$. La matriz correspondiente a la combinación en la recepción, $V_{M \times K}$ estará formada por vectores columna de la forma $V_k (M \times 1)$. En (2.15) se presenta la señal recibida en la BS como un vector ($M \times 1$):

$$y = \sum_{i=1}^K h_i s_i + n \quad (2.15)$$

donde n representa el ruido en la comunicación y s las señales del UL, de potencia p . La detección del usuario k -ésimo se consigue a partir de la señal recibida según (2.16).

$$V_k^H y = V_k^H h_k s_k + \sum_{\substack{1 \leq i \leq K \\ i \neq k}} V_k^H h_i s_i + V_k^H n \quad (2.16)$$

En (2.16), el primer sumando representa la señal deseada a recuperar, el sumatorio recoge la interferencia producida por el resto de los usuarios (por eso se excluye el k -ésimo que es el de interés) y el tercer sumando es la contribución del ruido. El superíndice H indica que la matriz es herm tica. Finalmente, podemos obtener para dicho usuario k -ésimo la $SINR_k$, tal que:

$$SINR_k = \frac{|V_k^H h_k|^2}{\sum_{\substack{1 \leq i \leq K \\ i \neq k}} |V_k^H h_i|^2 + \frac{|V_k^H|^2}{sn_k}} \quad (2.17)$$

donde $SINR$ es la relación señal a ruido entre el número de usuarios total interferente. La eficiencia espectral de un usuario y del colectivo a cada frecuencia f_q , se evaluarán según (2.18) y (2.19), respectivamente.

$$SE_k(f_q) = \log_2 \left(1 + SINR_k(f_q) \right) \quad (2.18)$$

$$SE_T(f_q) = \sum_{i=1}^K SE_i(f_q) \quad (2.19)$$

Para concluir con el cálculo de la eficiencia y haciendo referencia al apartado de MIMO masivo, se incluyen las fórmulas de dos de los modelos de combinación propuestos. Exponemos de nuevo la necesidad de que la BS conozca perfectamente el canal:

- MRC. La matriz en combinación corresponde con la del estado del canal, tal que $V = H$.
- Zero-Forcing. Se consigue a partir de la matriz pseudo-inversa del canal como $V = H(H^H H)^{-1}$.

El modelo elegido será el Zero-Forcing, como punto medio entre la complejidad en procesado y su rendimiento.

2.3 MIMO MASIVO

Una de las características que trae consigo la nueva generación 5G es el desarrollo y la incorporación de técnicas como MIMO masivo, ya que se busca extraer todos los recursos disponibles del canal mejorando así el funcionamiento del sistema para poder optimizarlo. Con esta tecnología se consigue la escalabilidad de la que carecía el Multi-User MIMO (basado en el MIMO punto a punto), de forma que se aumenta el tamaño del sistema y no se alcanza el límite de Shannon.

MIMO es una tecnología de radiocomunicaciones que se refiere a enlaces de radio con múltiples antenas en el lado del transmisor y del receptor. Debido a las múltiples antenas, la dimensión espacial puede ser explotada para mejorar el desempeño del enlace inalámbrico, haciendo la señal más fuerte, más confiable y transmisiones más rápidas. Se podría decir que se refiere a la forma como son manejadas las ondas de transmisión y recepción en antenas para dispositivos inalámbricos como enrutadores. En el formato de transmisión inalámbrica tradicional la señal se ve afectada por reflexiones, lo que ocasiona degradación o

corrupción de la misma y por lo tanto pérdida de datos. MIMO aprovecha fenómenos físicos como la propagación multicamino para incrementar la tasa de transmisión y reducir la tasa de error.

Además, se define como una red celular multiportadora formada por un conjunto de células que trabajan sincronizadas bajo el protocolo TDD (división por multiplexación en el tiempo). A partir de un número de antenas superior a la unidad, las estaciones base logran tener una visión casi determinista del entorno, lo que impone una mayor fiabilidad, reducción de los desvanecimientos y la BER. [10] Cada estación base interactúa simultáneamente con una serie de terminales móviles en muestras de tiempo y/o frecuencia, de forma que las señales en recepción son procesadas por combinación lineal y transmitidas en condiciones de directividad (beamforming). Esa precisión crece con el número de antenas que han de estar lo suficientemente alejadas eléctricamente para que no haya correlación de señal.

Las ventajas que introducen los “Large-Scale Antenna Systems”, comprenden las ganancias de array, diversidad y multiplexado, el incremento del rendimiento y la eficiencia espectral, la reducción de la potencia radiada, y la simplificación del procesamiento de señales. De esta definición se pueden contextualizar tres rasgos propios del MIMO masivo:

El multiplexado en ganancia a partir del uso de SDMA para dar cobertura a los terminales móviles que comparten recursos de tiempo y frecuencia y sabiendo que:

- Disposición de un número de antenas por estación base superior al número de usuarios por célula para lograr la supresión eficiente de interferencias. Para conservar esta relación, la cantidad de antenas deberá aumentar acorde al incremento de dispositivos.
- TDD para evitar valores elevados de CSI y el uso de modelos de aproximación del canal.

Por una parte, el número de antenas de la BS es independiente del tiempo que comprende la obtención del CSI, lo cual solo se requiere para las estaciones base. Por otra, se empareja el multiplexado de la precodificación lineal empleado en el enlace descendente, DL, con la demultiplexación del precodificado en el enlace ascendente, UL.

El esquema que sigue cada terminal móvil se puede asociar con una configuración SIMO, tal y como se muestra en la **Figura 2.2**. Los K usuarios transmiten φ_k datos que son recibidos por las M antenas que conforman el

sistema, y cuya respuesta en frecuencia (usuarios-antenas) se denota mediante g_{mk} . Para recuperar correctamente cada símbolo transmitido, se combinan linealmente las señales recibidas correspondientes a su UE y son ponderadas con el complejo conjugado de la estimación del canal respectivamente.

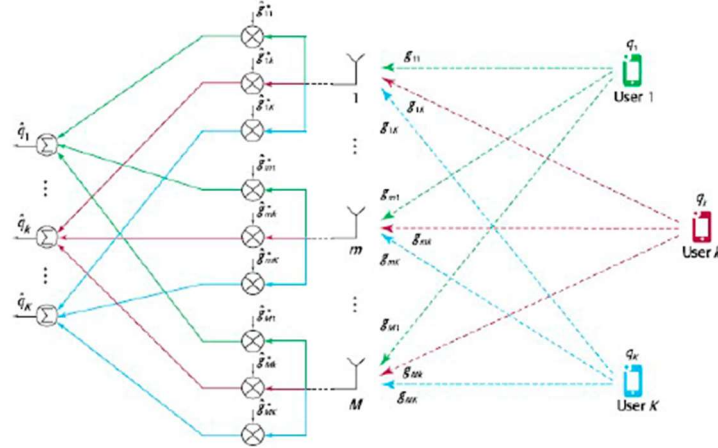


Figura 2.2 Ejemplo de sistema MIMO $M \times N$ en enlace ascendente

Operando con las equivalentes se consigue un aumento de la SNR . Finalmente, el modelo de la señal recibida en el UL, Y_j , se plasma en (2.20).

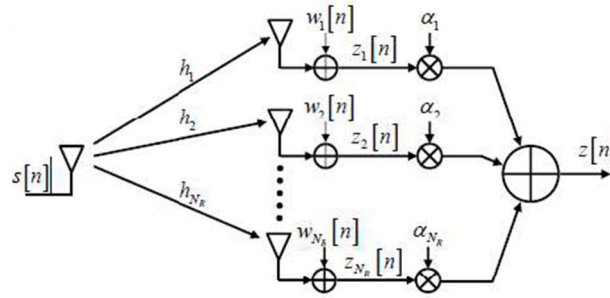


Figura 2.3 Esquema SIMO de un único UE

$$Y_j = \sum_k^{K_j} h_{jk}^j s_{jk} + \sum_{\substack{1 \leq l \leq L \\ l \neq j}} \sum_{i=1}^{K_l} h_{li}^j s_{li} + n_j \quad (2.20)$$

En (2.20) L representa las células del clúster, K el número de UE, el primer sumatorio corresponde a la respuesta del canal a las señales deseadas, el doble sumatorio a la respuesta del canal para la interferencia intercelular y el ruido n_i , de media 0 y varianza σ_{UL}^2

Para finalizar con la descripción del modelo de MIMO masivo en el UL, comentaremos brevemente técnicas para conseguir diversidad espacial en la recepción. Dejando atrás criterios como el Antenna Selection, Threshold Combining o Equal-Gain Combining, se pueden destacar las opciones que se barajan de menor a mayor complejidad, es decir, mayor carga computacional:

- Maximal Ratio Combining: Las señales de las distintas antenas se combinan coherentemente, ponderando con mayor peso las contribuciones de las ramas con mayor SNR. Empleando un filtro adaptado se consiguen separar las componentes ortogonales, tal que:

$$SNR_{MRC} = \sum_{j=1}^M SNR_j \quad (2.21)$$

- Zero-Forcing: Consiste en aplicar el estimador Least-Square y posteriormente determinar qué solución es la más próxima al símbolo transmitido. Para eliminar la interferencia entre usuarios se hace uso de la matriz pseudo-inversa del canal MIMO. La dificultad computacional del algoritmo viene determinada por la obtención de esta matriz.
- Minimum Mean Square Error: En este caso, se utiliza el estimador MMSE en lugar del Least-Square. A partir de la correlación espacial obtiene estimaciones de las características estadísticas del canal. Para los casos en los que el conocimiento de las estadísticas es imperfecto, las ganancias no sufren fuertes variaciones.

La eficiencia espectral que se consigue con cada modelo va ligada al aumento de complejidad. Los mejores resultados, por lo tanto, se conseguirán con el último método. Sin embargo, la opción más plausible de utilizar es la del Zero-Forcing, ya que ofrece un compromiso entre las prestaciones y la carga computacional. En la Figura 2.4 y Figura 2.5 se puede apreciar el comportamiento de estos modelos junto a sus variantes como son el Regularized Zero-Forcing, single-cell MMSE y multi-cell MMSE:

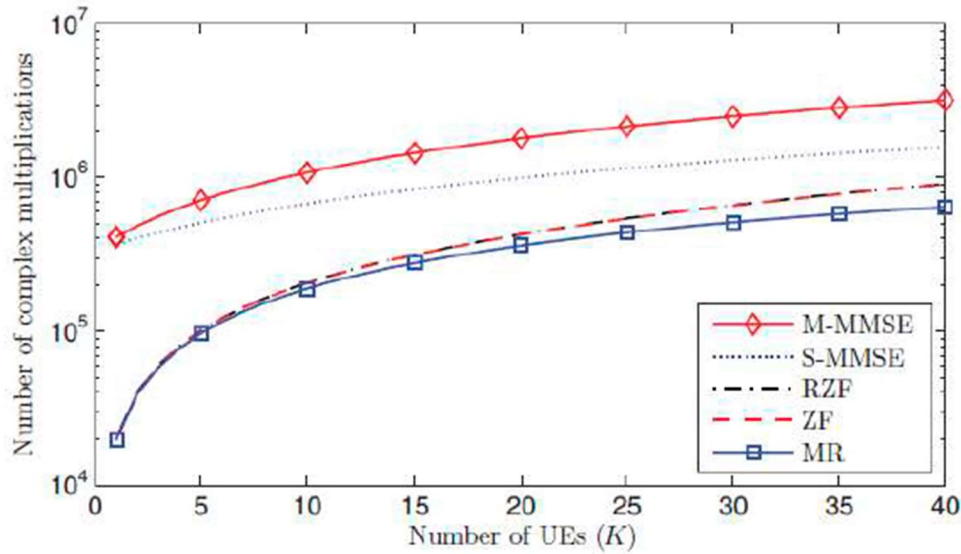


Figura 2.4 Comportamiento de los modelos frente a 100 antenas y un número de usuarios variable.

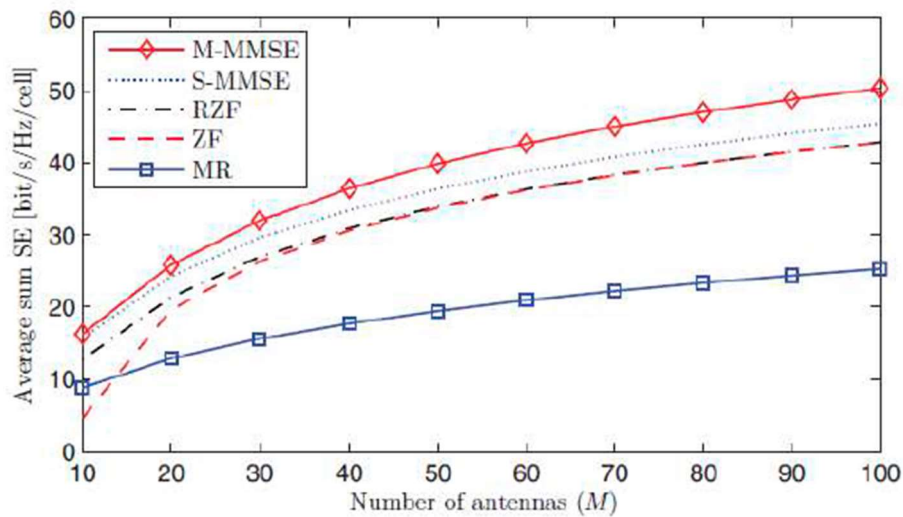


Figura 2.5 Eficiencia espectral de los modelos para un número de antenas variable.

Por otra parte, hay que añadir la existencia de investigaciones alejadas de la definición canónica que promueven alternativas en la forma de conseguir MIMO masivo, como son el uso del protocolo de duplexación por división en frecuencia, FDD, el uso de múltiples antenas en los dispositivos móviles y transmisiones mono-portadoras.

La utilización del FDD se antoja como una opción idónea debido al gran número de bandas de frecuencias reservadas para este protocolo, sin embargo, la complejidad que conlleva para este caso la estimación del canal hace inviable su

implantación más allá de pequeños sistemas. Una posible solución sería parametrizar el canal de forma que su estimación no fuese tan exigente.

Respecto al uso de múltiples antenas en terminales móviles, el principal aspecto positivo es el gran aumento de la eficiencia espectral. Por otro lado, tanto la complejidad como el coste y el tamaño del producto aumentan. Incrementar el número de antenas va ligado a un mayor número de vías de transmisión y recepción. En el UL el número de antenas equivale al número de emisiones simultáneas a la estación base. Para el DL, la señal solo se puede distinguir si el vector que describe la respuesta del canal para cada antena es conocido y aproximadamente ortogonal entre sí, asumiendo por lo tanto que las señales tienen diferente directividad espacial y logrando así la ganancia de array. El aspecto que categoriza la utilidad de esta técnica se basa en la visibilidad entre BS y el terminal móvil, UE.

A diferencia de las diversas contribuciones que intervienen en NLOS, en las situaciones en las que hay LOS predominante, se reduce la posibilidad de explotar todas las virtudes del MIMO en los UEs, ya que el ángulo entre los dos extremos de la comunicación tiende, con el campo lejano, a ser el mismo para todos los usuarios.

REFERENCIAS

- [1] I. a. M. R. C. 16th International Symposium on Personal, «The WINNER (wireless world initiative new radio) projectdevelopment,» *IEEE*, vol. 2, pp. 857-862, 2005.
- [2] European Project Millimetre-Wave Based Mobile Radio Access Network for Fifth Generation Integrated Communications (mmMAGIC), «Measurement Campaigns and Initial Channel Models for Preferred Suitable Frequency Ranges,» Marzo 2016. [En línea]. Available: <https://5g-mmmagic.eu/>.
- [3] A. A. E. S. S. S. Henry, «5G is Real: Evaluating the Compliance of the 3GPP 5G New Radio System With the ITU IMT-2020 Requirements,» *IEEE*, vol. 8, pp. 42828-42840,, Marzo 2020.
- [4] G. Institutes, Telecommunications, Glossary of Telecommunication Terms, Federal Standard 1037C, Febrero, 1997.
- [5] R. P. T. L. R. J. B. M. D. V. M. R.-P. J. R. P. J. R. Pérez, «Empirical Characterization of the Indoor Radio Channel for Array,» *IEEE*, vol. 7, pp. 94725-94736, Julio 2019.
- [6] R. P. Shinsuke Hara, Multicarrier Techniques for 4G Mobile Communications, Artech House, 2003.
- [7] R. P. T. M. D. L. V. a. J. B. J. R. Pérez, «Analysis of Massive MIMO Performance in an Indoor Picocell With High Number of Users,» *IEEE Access*, vol. 8, pp. 107025-107034, Junio 2020.
- [8] P. V. David Tse, Fundamentals of Wireless Communication, Cambridge University Press, 2005.

- [9] T. Saso, «Spectral Efficiency,» Encyclopedia of wireless and mobile, Enero 2008.
- [10] J. H. L. S. Emil Björnson, Massive MIMO Networks: Spectral, Energy, and Hardware Efficiency, Now Publishers, 2017.

Capítulo 3: SONDA DE MEDIDA DEL CANAL RADIO

En este capítulo se presenta el diseño y funcionamiento de la sonda de medida del canal radio ya existente y actualizada en el marco de este TFM, y que será utilizada para abordar la caracterización del canal radio en la banda de 26 GHz. Pero ¿por qué es tan importante el análisis de la propagación radioeléctrica y la consiguiente caracterización del canal en esa banda? Hay varias razones por las que las bandas de 26 y 40 GHz parecen mostrarse como las más prometedoras para los despliegues futuros de redes 5G, de entre las expuestas como candidatas en la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones (WRC-19) celebrada en Egipto en noviembre de 2019. La así denominada banda de 26 GHz (banda n258 según nomenclatura del 3GPP), que se concentra en el rango de 24,25 a 27,5 GHz, ver Figura 3.1, ya está experimentando aceptación en todo el mundo para los servicios de banda ancha móvil. Europa la ha elegido como una de sus "bandas pioneras" y así se recoge también en España en el Plan Nacional sobre 5G; mientras que África, Oriente Medio, Asia, los países miembros del Consejo de Cooperación Regional, RCC y partes de América Latina también planean usar este espectro para 5G.

La identificación de la banda para las IMT en la CMR-19 ha sentado las bases para la armonización y ayuda a crear la escala necesaria para los dispositivos y servicios de bajo coste. También hay beneficios técnicos y económicos, es decir, la banda de 26 GHz es adyacente a la banda de 28 GHz, lo que permite una amplia armonización, una relativa baja complejidad de los terminales, economías de escala y disponibilidad temprana de equipos. La banda de 28 GHz se utilizará para el 5G de ondas milimétricas en EE.UU, Corea del Sur, Japón, India y Canadá. Esta implementación se realiza fuera del proceso de la CMR-19 bajo una asignación móvil existente.

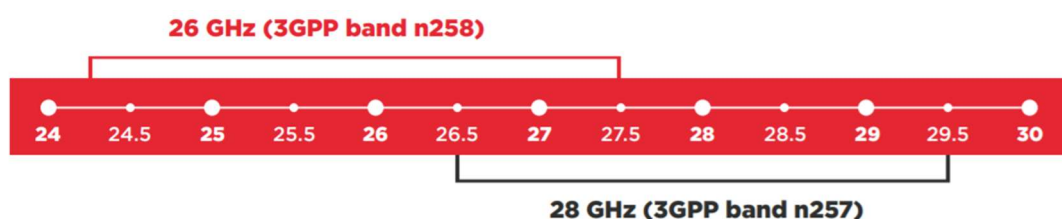


Figura 3.1 Bandas de interés marcadas por la Conferencia mundial de radiocomunicaciones 2019 (26 y 28 GHz)

Este capítulo se centrará en presentar al lector los principales aspectos del software de control de la sonda de medida del canal radio, haciendo hincapié en las principales contribuciones de este TFM, apoyando las explicaciones en las interfaces gráficas de usuario. Además, se podrá apreciar el proceso de realización de la aplicación desde una visión más técnica.

3.1 ELEMENTOS DEL SISTEMA DE MEDIDA

Como ya se ha planteado en capítulos anteriores, el objetivo principal de este TFM se centra en mejorar el sistema de medida del canal radio del que dispone el grupo investigador receptor y contribuir a la caracterización del canal en entornos de interior en la banda de 26 GHz. En materia de comunicaciones 5G y caracterización del canal radio, las investigaciones recientes del grupo de ingeniería de sistemas, antenas y radiopropagación (GISAR) se han centrado en la banda de 3 a 4 GHz (dentro de la así conocida para 5G new radio como FR1), siendo ésta por otra parte la banda que ha atraído la atención de los primeros despliegues comerciales de redes de quinta generación. Sin embargo, la sonda de medida de canal con la que históricamente el grupo GISAR ha realizado las medidas del canal radioeléctrico, sólo llega, por limitaciones del analizador vectorial de redes que se utiliza, hasta los 20 GHz. Además, esta sonda de canal, que utiliza un ordenador de sobremesa como elemento de control y adquisición automática de las medidas, es por su tamaño y peso, poco atractiva para moverla por los edificios o incluso, para aprovecharla como base para realizar medidas en escenarios de exterior. Para resolver ambos hándicaps, se planteó la modificación de la sonda de medida de canal, tomando como punto de partida la adquisición de un nuevo analizador de redes portátil y que permita subir en frecuencia hasta los nuevos rangos de frecuencia (FR2) por encima de los 24.25 GHz.

La adquisición del VNA P5006A de Keysight Technologies, que es capaz de realizar medidas desde los 100 KHz hasta 32 GHz, cuyo detalle se muestra en la Figura 3.2, sienta las bases que sirven como punto de partida a este TFM.



Figura 3.2 VNA P5006A de Keysight Technologies

Se trata de un analizador de redes de última generación y muy buenas prestaciones, con una interfaz virtual ya que carece de pantalla de control propia y es fácilmente manejable desde cualquier ordenador.

La complejidad del nuevo sistema de medida reside en compatibilizar el software y hardware ya existente de la antigua sonda de canal ya que, como se comentó en párrafos anteriores, este tipo de medidas se realizaban con otro VNA, en concreto el modelo E8362A de Agilent Technologies que se muestra en la Figura 3.3, siendo éste un analizador que trabaja en el rango de 45 MHz hasta los 20 GHz.



Figura 3.3 Analizador de redes PNA E8362A de Agilent Technologies

Para realizar las medidas en distintos puntos del espacio se dispone de un escáner plano. El escáner plano está formado por dos unidades lineales y dos servomotores que funcionan bajo las indicaciones de los controladores de posición, conectados al ordenador a través del puerto serie. Con la idea de mantener activa la antigua sonda de canal, las modificaciones en el software de control de la sonda tendrán como propósito permitir que convivan ambos equipos de medida, seleccionados a criterio por el usuario final. El E8362A se controla de forma remota mediante el bus GPIB y el VNA P5006A a través del puerto USB 3.0. Finalmente, los cables de radiofrecuencia (RF) deben conectarse en uno de sus extremos a ambos puertos del VNA seleccionado. En el otro extremo de los cables de RF, una vez realizada la calibración correspondiente se conectarán las antenas transmisora y receptora, de forma que, al medir en transmisión, el parámetro de scattering S_{21} será el que represente la función de transferencia del canal y el punto de partida para analizar el canal entre transmisor y cada punto receptor. Pensando en las medidas MIMO masivo y centrando el análisis en el enlace ascendente, la sonda de canal se completa con un escáner plano sobre el que se dispone una de las antenas (la receptora en nuestro caso) y que, controlado por el puerto serie, permite automatizar el movimiento de dicha antena receptora sobre un plano YZ, emulando un array virtual en recepción, tal y como se muestra en la Figura 3.4.



Figura 3.4 Escáner plano para el posicionamiento automático de antena, emulando un array plano

3.2 DESCRIPCIÓN DE LA APLICACIÓN

El principal problema que se plantea a la hora de la realización de este tipo de aplicaciones es proseguir en paralelo con la ejecución del software ya definida para el antiguo analizador de redes. El trabajo consiste en paralelizar todo lo que se hace con un analizador de redes y replicarlo en cuanto a funcionamiento con el nuevo analizador de redes. Para ello se ha creado una nueva interfaz gráfica, tomando como punto de partida la aplicación ya existente, desarrollada en el entorno gráfico de Matlab®. Las ventanas de la interfaz gráfica que se generan son llamadas GUIDE. Estas ventanas tienen dos vertientes y, en consecuencia, se generan dos tipos de archivos, un fichero *.fig* y otro *.m*, ambos con el mismo nombre. El fichero con extensión *.fig* contiene información sobre la apariencia visual del programa y los objetos que lo componen (botones, textos, menús, gráficos, etc.). El fichero *.m* asociado es el que contiene las funciones que se ejecutarán de forma controlada al presionar, escribir, seleccionar, etc. sobre los objetos definidos en el fichero *.fig*.

Los programas creados se organizan en una estructura de ventanas. Esta organización se centra en una ventana de menú principal desde la que se puede acceder presionando el botón correspondiente al resto de ventanas. Para abrir el programa sin tener Matlab abierto hay que hacer doble clic en el icono bienvenida.fig; entonces se arrancará Matlab y automáticamente también el programa en forma de una ventana de bienvenida (Figura 3.5). Al pulsar cualquier tecla desaparecerá la ventana de bienvenida y aparecerá el menú

principal. Otra forma de iniciar el programa es tecleando “bienvenida” desde la línea de comandos de Matlab (con el directorio de trabajo en la carpeta donde se ubique el programa). El conjunto de programas creados se puede ubicar donde se quiera, eso sí, manteniendo todos los archivos en la misma carpeta. Los archivos de texto que forman parte del programa almacenan información que se irá actualizando en cada ejecución del programa. Por ello, con objeto de que los programas funcionen correctamente, es fundamental que estos archivos puedan ser modificados; es decir, que en sus propiedades no tengan la pestaña de sólo lectura activada.



Figura 3.5 Ventana de bienvenida

3.2.1 Menú principal

El menú es la sección principal en la que se genera una bifurcación en la cual se pueden hacer dos tipos de medidas según se quiera, tal y como se muestra en la **Figura 3.6**.

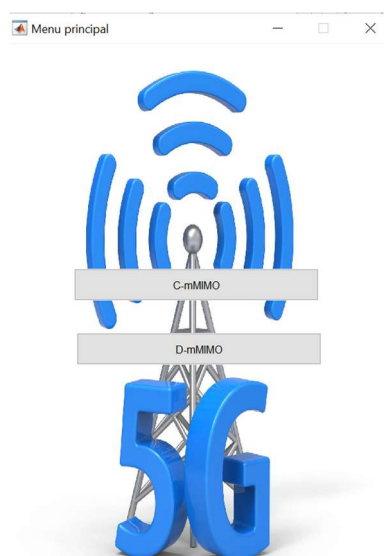


Figura 3.6 Menú principal

La primera de las subsecciones da acceso a las así denominadas medidas MIMO concentrado o C-mMIMO, entendiendo como tal las medidas MIMO clásicas en las que éstas se realizan empleando el escáner plano para emular un array virtual. En el otro extremo, se atiende a la posibilidad de realizar medidas del tipo MIMO distribuido o D-mMIMO, que en la literatura hacen referencia a la posibilidad de colocar las antenas del array distribuidas sobre una trayectoria arbitraria, lo cual pasaría a ser un tipo de medida punto a punto entre antenas transmisora y receptora, prescindiendo de la necesidad de utilizar el escáner plano. Esta última facilidad es una sección realizada exclusivamente para el análisis con el analizador de redes VNA P5006A.

Antes de proseguir con las siguientes subsecciones es necesario conocer qué es MIMO concentrado y distribuido, y cuáles son sus características más reseñables. La definición básica de un sistema MIMO distribuido se representa en la Figura 3.7. El sistema está compuesto por una estación base, BTS, con n antenas separadas entre sí unas pocas longitudes de onda y unos terminales, cada uno con una antena, que la BTS agrupa en grupos de n . La comunicación se establece entre la BTS y los diferentes conjuntos de n terminales. El término distribuido viene del hecho de que las antenas del extremo terminal no están concentradas en un único equipo, que es lo que pasa con MIMO concentrado, de ahí su nombre, si no que se encuentran separadas o distribuidas espacialmente entre varios equipos.

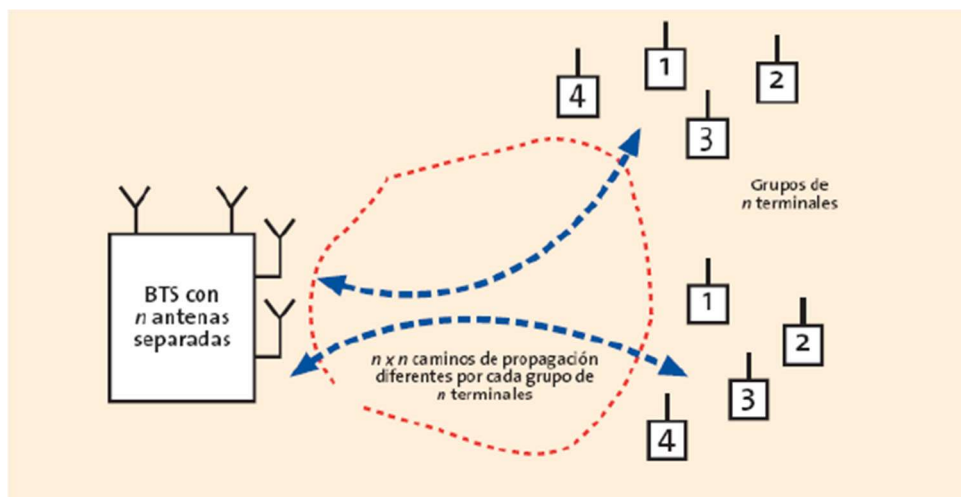


Figura 3.7 Esquema de un sistema MIMO distribuido

La primera gran ventaja del esquema D-mMIMO es que la separación entre terminales prácticamente garantiza la incorrelación de todos los caminos de propagación, lo que a su vez permite reutilizar los recursos radio del sistema hasta n veces, al menos en teoría.

De esta incorrelación “casi” asegurada entre caminos se desprende que se puede utilizar transmisión ciega en el enlace ascendente, sin necesidad de canal

de retorno. Con lo expuesto hasta ahora los recursos radio se reutilizan hasta n veces solo en el camino ascendente, aumentando únicamente la complejidad de la BTS. El paso siguiente es reutilizarlos también en el descendente, pero sin aumentar la complejidad de los terminales. Esto es posible mediante el mecanismo conocido como preecualización, que consiste en que, si la BTS conoce la matriz de transmisión del canal, H' , en el enlace descendente se puede preprocesar las señales, antes de transmitir las, multiplicándolas por el inverso de esa matriz H' .

La preecualización es posible porque la incorrelación de cambios se traduce en que la matriz H' está bien condicionada, y por tanto su inversa no es muy grande, y la multiplicación de las señales que se quiere transmitir por la matriz H' invertida no saca a los transmisores de la BTS de su zona lineal de funcionamiento.

Para que la BTS conozca la matriz H' se puede implementar un canal de retorno entre los terminales y la BTS. Es posible, sin embargo, utilizar otro procedimiento que conduce a un sistema mucho más simple. Consiste en utilizar multiplexación en el tiempo entre los enlaces ascendente y descendente, se trata de TDD como ya se ha explicado en el capítulo anterior, y utilizar tramas lo suficientemente cortas para asegurar que la duración de las ráfagas en sentido descendente más la duración de las ráfagas en sentido ascendente sea inferior al tiempo durante el cual el canal de transmisión se mantiene prácticamente constante. Si se cumple esta condición, la matriz de transmisión descendente es la traspuesta de la ascendente, que la BTS ya ha calculado como paso previo a la detección de las señales procedentes de los terminales.

3.2.2 C-mMIMO

Esta sección, como se ha comentado anteriormente, es una sección de la aplicación que da acceso a las medidas considerando en recepción un array virtual, empleando para ello el escáner plano disponible en el laboratorio (ver **Figura 3.9**).

El primer paso obligatorio para el perfecto funcionamiento de la aplicación es haber conectado previamente los motores del escáner al conector USB del ordenador (a través del conversor RS232-USB) donde se vayan a obtener y procesar las medidas. Para conectar la alimentación de los dos controladores habrá que levantar los dos interruptores magneto-térmicos mostrados en la **Figura 3.88**. Con esto ya se pueden enviar comandos y recibir respuesta del

controlador; pero para que los ejes se muevan, es necesario que estén activados además los interruptores ENABLE y RUN.

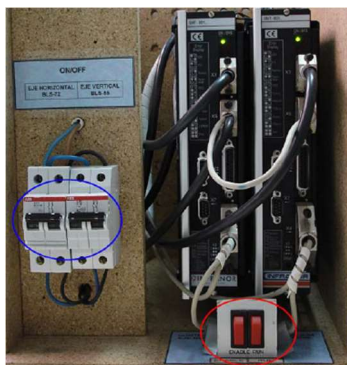


Figura 3.8 Controladores STM BD/1 e Interruptores: (azul) alimentación de los controladores, (rojo) de los motores.

En ningún caso se deberá forzar de forma manual el movimiento de la antena sobre el escáner plano. Esto provocaría un desfase entre la posición real del eje y la que tiene registrada el controlador. Por ello, hay que tener cuidado cuando se coloque o se quite una antena del plato de sujeción para no forzar el eje.

Posteriormente, es necesario conocer el puerto de comunicaciones que el ordenador le ha asignado al bus de control de los motores. Normalmente este puerto es fácil de conocer dependiendo del sistema operativo que se emplee, en el caso de Windows, basta con acceder a la sección de “Administrador de dispositivos -Puertos”. Una vez se ha identificado el puerto COMx, siendo x un valor numérico asignado, es necesario darle esa información a la aplicación para que esta pueda conectarse con ese puerto y comience la comunicación con el escáner. En el caso de que el puerto introducido no sea el correcto, la aplicación no proseguirá y el resto de las características no estarán disponibles. Si el puerto es el correcto, tras haber dado al botón aceptar, el escáner devolverá la posición exacta donde se encuentra la antena, que coincide con el último punto de medida realizado y en la sección de estado devolverá que el escáner se encuentra preparado. En este momento se tiene acceso al posicionamiento manual de la antena sobre el escáner plano y a la planificación de barridos para realizar una medida, de acuerdo a las facilidades que se muestran en la Figura 3.9.



Figura 3.9 Ventana de configuración de barrido plano

En este punto se pueden hacer varias cosas, una de ellas es poder mover manualmente el punto sobre el plano donde se encuentra situada la antena. Se ha de recordar que se trata de un escáner plano con coordenadas x e y delimitadas en el rango que se encuentra en el panel de “Valores máximos barrido” sobre el panel de estado. Sobre el panel de posicionamiento absoluto, además de poder mover al punto deseado también se puede realizar el proceso de calibración del escáner, mover al punto de calibración y localizar el origen.

No obstante, las posiciones que el programa ofrece de cara al usuario no se corresponden con las que realmente intercambia con el controlador. Habrá un desfase entre ambas para cada eje que el programa será capaz de obtener y de manejar. En otras palabras, el inicio físico del recorrido del eje se corresponde para el usuario con la posición 0mm; pero para el controlador será una posición determinada (x) que puede ser positiva o negativa. Así, por ejemplo, cuando el usuario solicita la posición 200mm, el controlador recibe la posición 200+x. Este proceso es transparente al usuario que en ningún momento tiene conocimiento de las posiciones reales del controlador.

En cuanto al botón localizar origen, su función será la de encontrar el desfase anteriormente comentado entre las posiciones que se ofrecen de cara al usuario y las que maneja el controlador. Cuando se pulsa este botón, los dos ejes se dirigen a los extremos inferiores del recorrido físico (hasta que pulsan los interruptores de final de carrera). Una vez detenidos los ejes, se envía al controlador el comando PF para que devuelva la posición en la que se encuentran los ejes. La posición obtenida se guarda en el archivo de texto posicion_origen.txt.

Esta operación acelera el desgaste de las correas de transmisión del escáner por lo que solamente hay que realizarla en caso necesario.

El siguiente paso natural es la elección del analizador, se puede elegir entre el VNA E8362A o el PNA P5006A para así acceder a configurar las características de las medidas que realizará el analizador. Una vez configurado uno de los analizadores, la aplicación nos marcará con un tick el analizador con el que estamos trabajando ya que el otro quedará bloqueado. En este punto el panel de Barrido quedará desbloqueado y en él se puede definir propiamente como se realizará el barrido sobre el escáner plano, ya sea sobre el eje x constante o sobre el eje y constante, con diferencias significativas en el tiempo final de barrido y medida según la elección, por las diferencias mecánicas de ambas unidades lineales y de los motores de cada eje. El sistema de barrido óptimo es el que mantiene el sentido de giro constante a lo largo de todos los puntos de medida. Este sistema de barrido se muestra en la Figura 3.10 y es el que se implementó en un principio para el escáner plano.

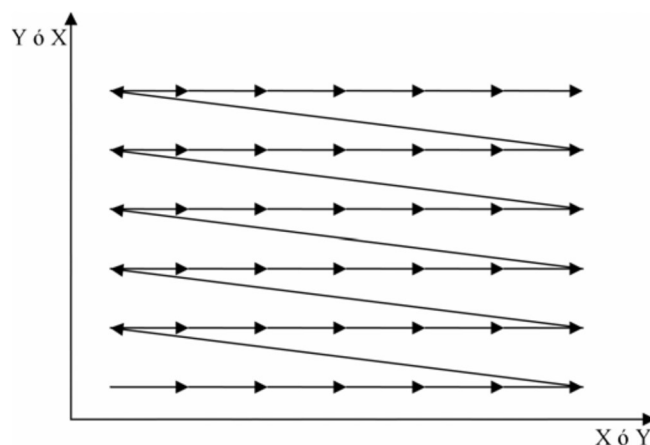


Figura 3.10 Sistema de barrido original

Sin embargo, con objeto de reducir el tiempo de medida manteniendo las mismas prestaciones en cuanto a precisión del posicionamiento, se implementó hace años una mejora que consiste en aprovechar el movimiento de retroceso del eje para tomar medidas. Este sistema de barrido se muestra en la Figura 3.11 y con él se consigue reducir a la mitad el desplazamiento total de uno de los ejes del barrido. Hay que precisar que todo lo referente a estrategias de medida con el escáner plano, software base de control de los ejes y movimiento de la antena sobre dicho escáner queda fuera del desarrollo de este TFM. Es decir, se ha migrado la aplicación original ya existente, que ya contemplaba todas estas funciones comentadas en esta sección, procurando que la nueva interfaz desarrollada y mostrada en la Figura 3.9 no perdiese ninguna funcionalidad.

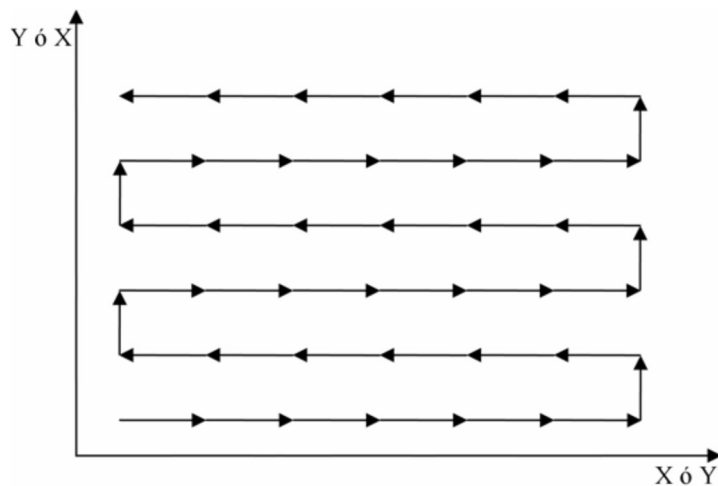


Figura 3.11 Sistema mejorado de barrido.

Después de haber realizado la configuración del barrido basta con pulsar el botón *iniciar* para empezar a realizar las medidas. En este momento se requerirá la ubicación de destino donde se guardarán las medidas pertinentes (ver **Figura 3.12**). También se puede introducir la distancia entre las antenas y algún comentario que ayude a identificar algunos aspectos de la medida a realizar.

Figura 3.12 Ventana de ubicación de archivos de medida

3.2.3 Configuración E8362A

Antes de poder configurar el analizador es necesario generar una conexión con el mismo. La conexión con el equipo se hace a través del bus GPIB identificando tarjeta y dirección del equipo sobre el bus, de acuerdo a la pantalla de acceso que se muestra en la Figura 3.13. Una vez establecida la conexión se accede a una ventana de configuración como la que se ilustra en la **Figura 3.13**. Cabe destacar que la interfaz de la Figura 3.14 coincide con la original del software de control heredado al comienzo del TFM.

Figura 3.13 Ventana de configuración de conexión al E8362

Figura 3.14 Ventana de configuración de las características del analizador E8362A

Como se puede apreciar, desde aquí podemos realizar varias cosas, ya sea desde el panel de parámetros de medida o desde el panel de opciones de calibración. Este último panel obtiene el número de *Calset* (ajustes de calibración) guardado en el analizador y todas sus características para permitir al usuario volver a configurar el analizador de la misma forma, a partir de un calset guardado en memoria. Otra de las opciones es que desde el panel de parámetros de medida se puede definir cómo será la traza de medida, es decir, el rango de frecuencias de trabajo y el número de puntos de medida dentro de este mismo rango salvo que se quiera estudiar un barrido en frecuencia, pero en el caso de que se desee solo estudiar una frecuencia fija también se puede configurar sobre el cuadro de frecuencia fija. Si lo que se pretende es estudiar unas frecuencias en

concreto, desde el cuadro de lista de frecuencias se puede ir añadiendo las frecuencias deseadas. También se puede configurar el ancho de banda de la medida sobre el campo *ValorIF* en el panel de *BandWidth*, además de poder elegir qué tipo de parámetros *S* se quieren obtener, el número de muestras y la potencia que debe emplear la fuente del analizador.

Cuando ya está todo dispuesto basta con pulsar sobre el botón Cargar configuración y ésta se volcará sobre el analizador. La barra de estado informará si se ha realizado bien la configuración o si ha habido algún tipo de fallo.

3.2.4 Configuración P5006A

Al contrario que con el caso anterior, este analizador emplea una conexión casi transparente al usuario, ya que el protocolo de comunicación lo realiza a través de USB mediante un bus PXI cuya dirección es siempre la misma. La ventana que se le muestra al usuario es la siguiente (ver **Figura 3.15**).

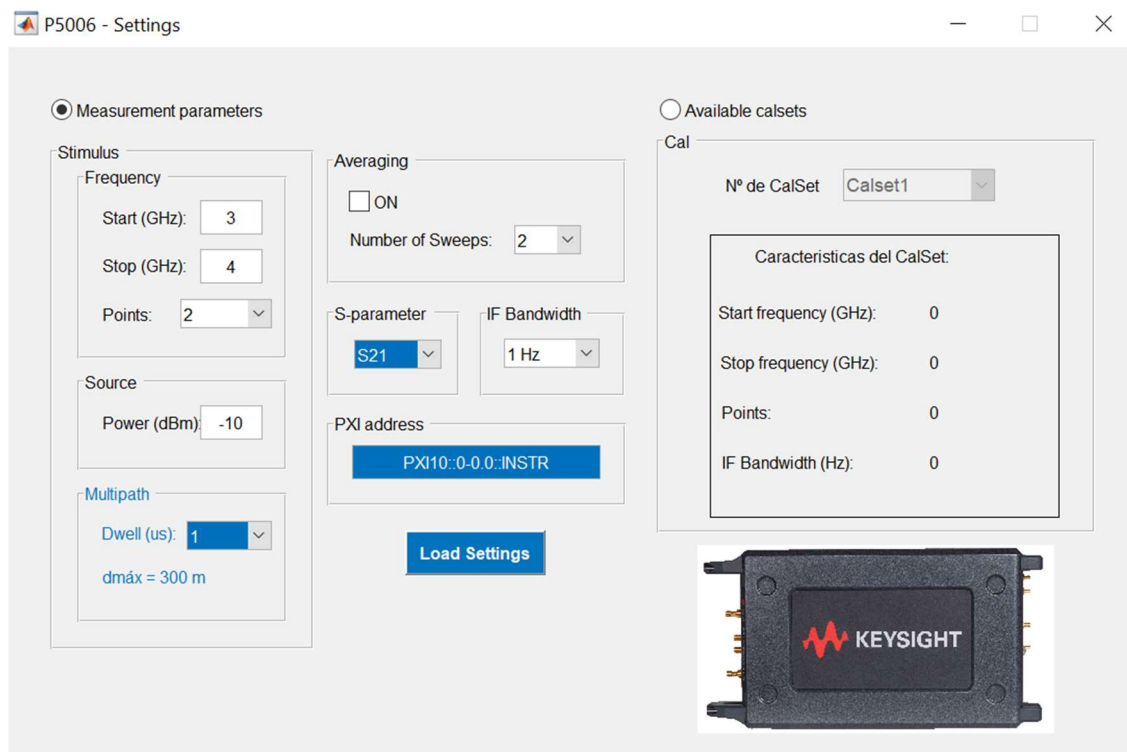


Figura 3.15 Ventana de configuración del VNA P5006A

Como en el caso anterior, se tienen varias opciones, en el caso del panel *Measurement parameters* se puede configurar el rango de frecuencia de trabajo, además del número de puntos que configuran este rango, la potencia de la fuente y el Dwell que dependerá de la distancia entre antenas para garantizar que las medidas se realicen sin solapamiento entre ellas. También es posible realizar un

average de las medidas realizadas e implementar varios barridos. Además, se puede elegir entre medir solo un parámetro de scattering o todos para caracterizar mejor el medio, aunque para la realización de este trabajo solo será necesario la medida del parámetro S_{21} .

Una novedad que se introduce es la opción del panel *Cal*, al cual se puede acceder pulsando sobre el botón *Available calsets*. Una vez pulsado, la aplicación se conecta con el analizador de redes y trata de obtener todos los calset almacenados en su memoria interna, obteniendo así los parámetros con los que se realizaron las distintas calibraciones en su momento.

A continuación, pulsando sobre el botón *Load Settings* se guardará la configuración para posteriormente iniciar el barrido sobre el escáner. Como en el caso del otro analizador, al realizarse la correcta configuración del mismo en la sección de *Barrido plano* el analizador será marcado con un tick que nos indicará que la aplicación esta lista para iniciar el barrido.

3.2.5 D-mMIMO

Como se puede apreciar en la **Figura 3.6**, desde el menú principal se podían acceder a dos tipos de medida del canal radio diferentes, una de ellas en este caso trata de realizar medidas punto a punto, asumiendo que el array receptor está distribuido con una forma arbitraria sobre un escenario, sin necesidad por tanto de emplear el escáner plano. La interfaz de usuario es la misma que en el caso de la configuración del P5006A (ver **Figura 3.155**). Para este caso particular, al pulsar sobre *load settings* se abrirá una ventana para guardar la medida que se realice (ver **Figura 3.166**).

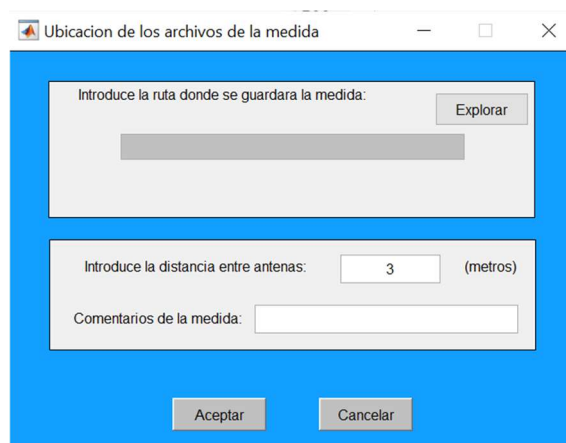


Figura 3.16 Ventana para seleccionar ruta en la que salvar la medida distribuida

3.3 ESQUEMA DESCRIPTIVO DE LA APLICACIÓN

En la Figura 3.17 se muestra de forma esquemática la funcionalidad completa de la aplicación de control y medida de la sonda de canal, mejorada y adaptada en el marco de este TFM.

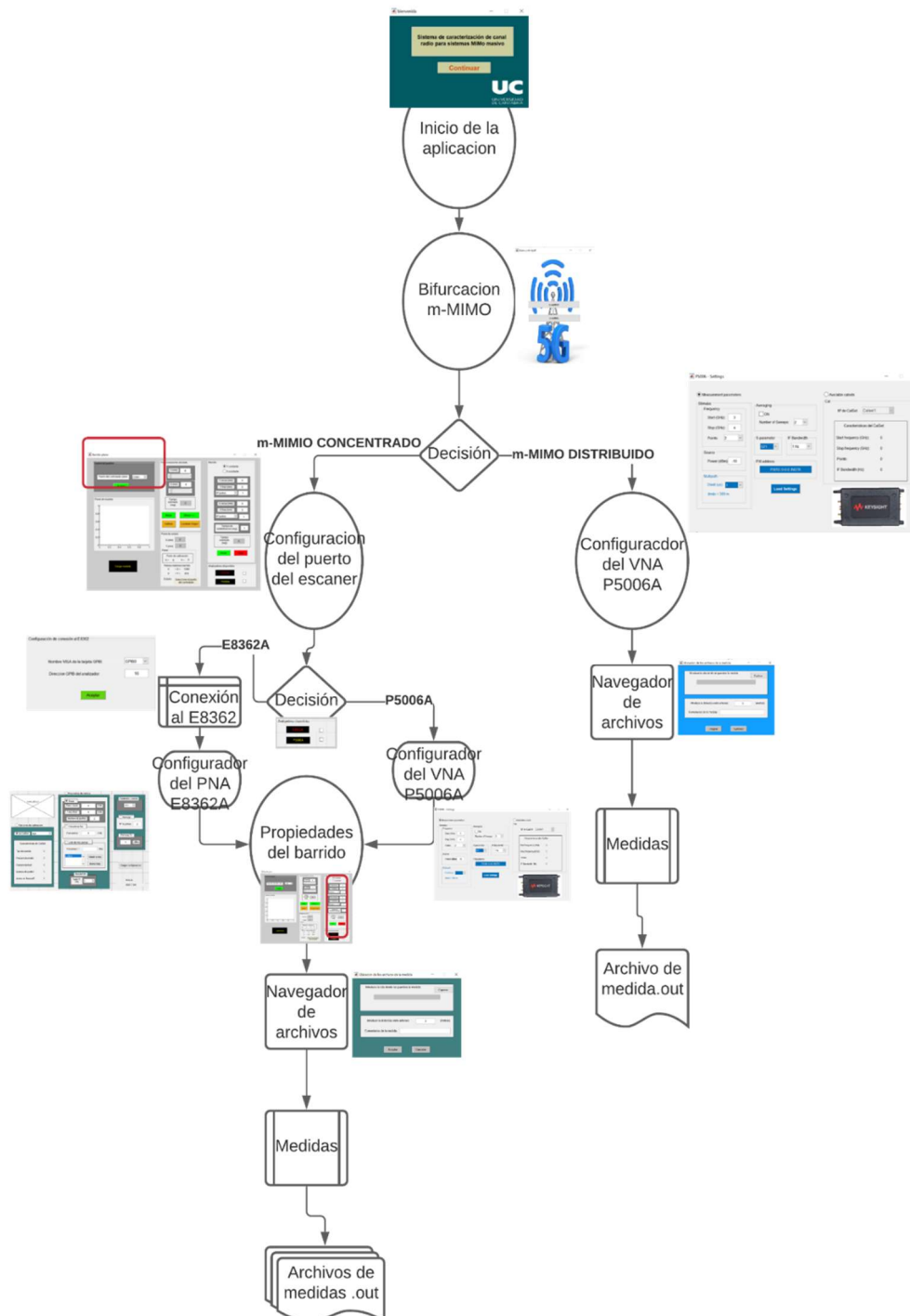


Figura 3.17 Esquema de configuración para la obtención de las medidas en la aplicación

Tal y como se ilustra en la Figura 3.17, se ha contemplado la incorporación del nuevo equipo de medida, respetando las funciones de medida ya existentes en la sonda de canal original. En una especie de diagrama de flujo adaptado, se ha intentado mostrar cómo se han integrado tanto los dos tipos de medida (C-mMIMO y D-mMIMO), como los dos analizadores vectoriales de señal.

3.4 CONTRIBUCIONES A LA APLICACIÓN ORIGINAL

Como se ha comentado anteriormente, la aplicación no ha sido desarrollada íntegramente por una sola persona, sino que, son varias y numerosas las personas que con los años han contribuido a la evolución de la misma. En nuestro caso, partimos de una versión ya existente, que ya contemplaba la mayoría de las funciones comentadas en este capítulo, pero sin embargo se ha desarrollado una nueva interfaz gráfica de cara al usuario final en la que se han desarrollado nuevas funciones similares, pero para dispositivos de medida nuevos; tal es el caso del analizador de redes VNA P5006A. Además, se ha añadido la posibilidad de realizar las medidas desde los dos analizadores de forma independiente, sin modificar la estructura general del código anterior.

Para poder destacar el trabajo realizado, tenemos que comparar el mismo con la versión anterior de la aplicación. En esa versión se contemplaban diversos tipos de medidas espaciales, pero una de las características más significativas de esta nueva versión es que se centra en realizar medidas sobre un escáner plano. Al tener la antigua versión varias funciones que la nueva no contempla, la recopilación de los datos para la comunicación entre dispositivos ha tenido que cambiar. Tal es el caso de la configuración del puerto del escáner (Control de puertos), que pasa de ser un guide independiente a estar incrustado sobre otro (Barrido plano). Este punto es muy importante, ya que, si esos datos no son introducidos de forma correcta, no se podría continuar con el resto de las funciones del analizador.

En cuanto a la recopilación de los datos de usuario, en la versión anterior esto se realizaba con estructuras de datos, *handles*, a las cuales se podía acceder mediante funciones de Matlab como *getappdata*. Una vez abierta la estructura de datos *handles*, los datos de la misma no se actualizaban hasta que se cerrara la estructura, de forma que, si quisiéramos acceder a los datos que estoy actualizando desde otra función, seguiría obteniendo los valores antiguos o incluso un error en el caso de que la variable que se solicite sea nueva. Para cerrar la estructura de datos se empleaba la función *setappdata*. Para que el trasiego de datos de una función a otra fuera más dinámico se emplearon variables globales,

que en MATLAB se introducen de la siguiente manera: *global nombre_variable*. Así cada vez que se desee acceder a un dato actualizado o no, se puede hacer de forma mucho más fácil. Para que la transición sea lo más continua posible, no se ha alterado el código existente, sino que donde se ha estimado conveniente se han realizado estas modificaciones.

Por otro lado, todas las ventanas o guides que se han podido apreciar en este capítulo han sido creadas o ligeramente modificadas de forma visual. Para ello se ha empleado la herramienta GUI de MATLAB. Esta aplicación es una herramienta de desarrollo gráfico que combina diseño gráfico con lenguaje de MATLAB para la lógica del programa a realizar.

Otro de los aspectos más interesantes desarrollados fue la extracción de CalSets del nuevo analizador de redes, que no son más que los datos de calibraciones anteriores. Prácticamente tiene el mismo funcionamiento que en el caso del analizador PNA 8362A pero, en este caso, como ya se puede observar el analizador VNA P5006A no tiene una pantalla externa y para su manejo es necesario emplear algunas herramientas, tales como, Network Analyzer y Keysight Command Expert. Desde Network Analyzer, una vez conectado correctamente con el dispositivo como si de una pantalla del mismo se tratara, podemos controlar el analizador desde un ordenador. Se ha de recordar que la comunicación se realiza mediante USB y la dirección física del dispositivo no varía salvo que desees cambiarla, aunque no se recomienda.

En el caso de Keysight Command Expert (ver **Figura 3.18**), se trata de una herramienta muy potente que combina comandos de instrumentos, documentación, verificación de sintaxis y ejecución de comandos, todo en una interfaz muy simple. Command Expert trabaja con instrumentos que utilizan comandos estándar para instrumentación programable (SCPI), controladores IVI-C o IVI COM. En nuestro caso trabajamos con el controlador IVI-C. IVI-C es el estándar de arquitectura del controlador IVI que se basa en las especificaciones del controlador de instrumentos VXIplug&play. Los controladores IVI-C funcionan directamente con entornos de desarrollo habilitados para VXIplug&play, como por ejemplo Agilent VEE, LabWindows/CVI y LabVIEW de National Instrument.

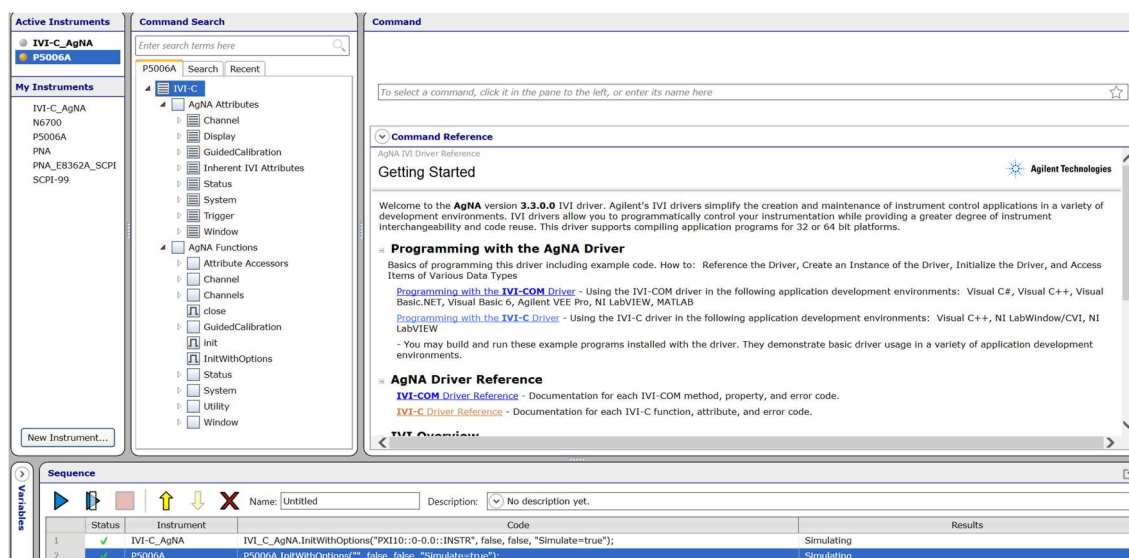


Figura 3.18 Interfaz de presentación en Keysight Command Expert

Entre las funciones más destacadas se puede resaltar la posibilidad de encontrar comandos de instrumentos, poder ver la documentación completa del comando, verificar la sintaxis del comando, construir secuencias de comandos de instrumentos, ejecutar secuencias de comandos de instrumentos, integrar secuencias en entornos de aplicaciones de PC y simular esos mismos instrumentos una vez se han guardados sus datos dentro del ordenador. Para poder acceder a los datos de CalSets se realizó el proceso que se describe en la Figura 3.19.

Como este es un caso representativo de cómo se ha realizado la comunicación con el nuevo analizador de redes VNA P5006A, en la sección de anexos, es donde se puede apreciar cómo se hace desde el punto de vista de código empleado, empleando como se ha dicho anteriormente librerías propias de Keysight y de MATLAB a la hora de trabajar con este tipo de instrumentación.

Además de todo esto, este trabajo se centró en la paralelización del sistema en cuanto al uso de ambos analizadores de redes sobre la aplicación, conservando la estructura general del código ya existente, desechando y agregando código MATLAB para el correcto funcionamiento de la aplicación, tal y como se ha descrito en secciones anteriores, para obtener así una caracterización del canal representado con sus parámetros de scattering, S . Pero, además, el propósito último de todo este desarrollo software es realizar una campañas de medidas para probar el funcionamiento de la sonda de canal modificada, midiendo sobre escenarios con visión directa en un escenario de interior, y en la banda de interés de 26 GHz, aspectos que centran el objetivo del siguiente capítulo de este documento.

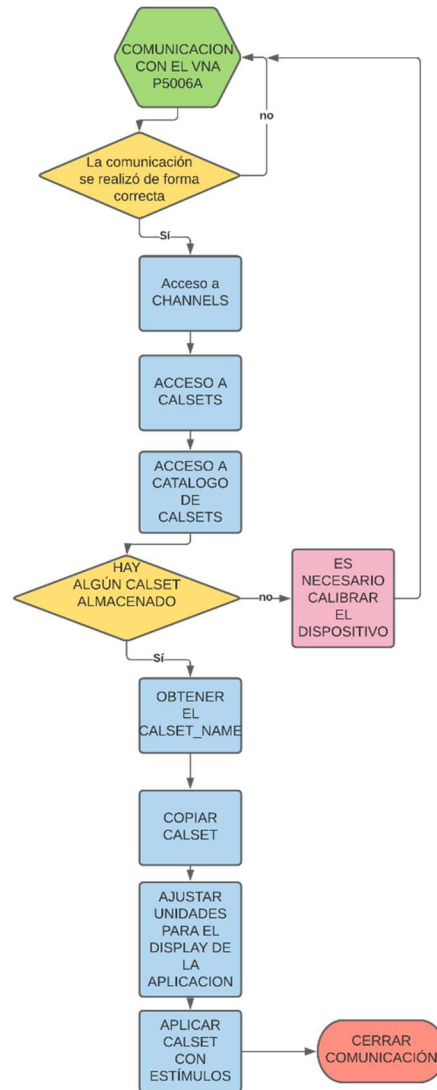


Figura 3.19 Diagrama de obtención de parámetros de calibración del VNA P5006A

Capítulo 4: RESULTADOS: MEDIDAS CON LA SONDA DE CANAL

4.1 Contexto

El Grupo para la Política del Espectro Radioeléctrico (RSPG) de la Unión Europea en sus dictámenes sobre una hoja de ruta estratégica hacia la 5G en Europa [1], ha identificado la banda de frecuencias 24,25 a 27,50 GHz (banda de 26 GHz), como banda pionera para la tecnología 5G y recomendó a los Estados miembros que pusieran a disposición de esta tecnología una cantidad de espectro suficientemente amplia en dicha banda (por ejemplo, 1 GHz) para 2020, en respuesta a la demanda del mercado. Asimismo, los Estados miembros debieran permitir, el 31 de diciembre de 2020 a más tardar, el uso de al menos 1 GHz de la banda de frecuencias de 26 GHz para facilitar la implantación de la tecnología 5G, siempre que exista una clara demanda del mercado y no haya limitaciones importantes para la migración de los usuarios existentes. A día de hoy, esto ya se está realizando y es por ello la novedad que introduce este trabajo.

El uso de la banda de frecuencias de 26 GHz se encuentra armonizado para los sistemas terrenales capaces de prestar servicios de comunicaciones electrónicas de banda ancha inalámbrica en la Unión. Tal y como se establece en esta decisión de ejecución [2], se proveerá una amplia protección para los servicios de satélite existentes en la banda e incluso se ofrecerá la posibilidad de respetar usos actuales en enlaces fijos siempre que resulten compatibles con los servicios de comunicaciones electrónicas.

A nivel nacional, en España esta banda de frecuencias se encuentra regulada mediante la nota de utilización nacional UN-92 del Cuadro nacional de atribución de frecuencias. Esta nota de utilización UN-92 establece que esta banda debe quedar liberada de los usos actuales del servicio fijo a más tardar el 31 de diciembre de 2021. En la actualidad se encuentra disponible para su licitación la cantidad de 1 GHz que, de acuerdo con lo establecido en el Código Europeo de las Comunicaciones Electrónicas, y en la Decisión de Ejecución (UE) 2019/784 de la Comisión, de 14 de mayo de 2019, debe ponerse a disposición de los operadores a más tardar el 30 de marzo de 2020. La situación actual del uso de esta banda de frecuencias se muestra en el gráfico siguiente, donde las frecuencias ya disponibles para la prestación de servicios de comunicaciones electrónicas están marcadas en azul como se puede observar en la **Figura 4.1**.

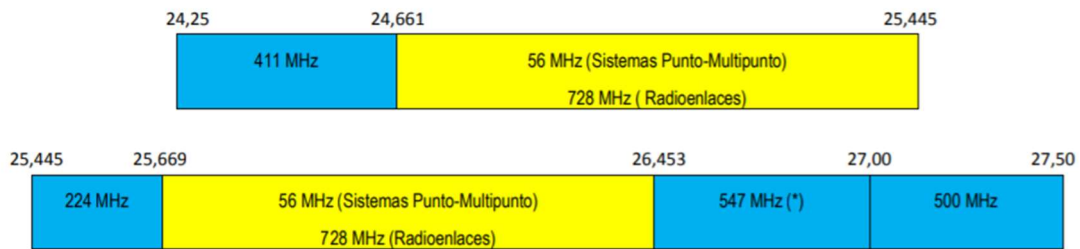


Figura 4.1 División del espectro en la banda de los 26 GHz

La subbanda en la cual se centrará este trabajo está en la parte baja de este espectro, en el rango de 24.25 a los 24.661 GHz, que no es más que la primera subbanda que aparece marcada en azul en la figura anterior. El uso de esta banda no solo es una novedad a nivel nacional, sino que también nunca antes en el grupo GISAR se había subido tanto en frecuencia para aplicaciones de caracterización del canal radio y, por lo tanto, es un añadido más al valor de este trabajo el conseguir datos fiables que aporten conocimientos técnicos que sirvan de punto de partida para posteriores estudios.

Con el fin último de poner a prueba la herramienta software y testar la sonda de canal a 26 GHz, en este capítulo se incluyen los resultados obtenidos al realizar una campaña de medidas en un entorno de interior de la Universidad de Cantabria, analizando las limitaciones de la sonda de canal y los resultados de capacidad y eficiencia espectral obtenidos.

4.2 Disposición del entorno de medida INDOOR

La vista en planta del entorno de interior donde se realizará la campaña de medidas se muestra en la **Figura 4.2**. Este edificio pertenece la Universidad de Cantabria, en concreto se trata del Edificio de Ingeniería de Telecomunicación - Profesor José Luis García. La planta del edificio consta principalmente de oficinas y laboratorios de computación con un gran pasillo que da acceso a esas salas. En cuanto a los materiales del edificio, estos se componen principalmente de hormigón armado, teniendo paredes y cielorrasos con paneles de yeso, así como puertas metálicas en todas las estancias interiores. Las habitaciones se caracterizan por la presencia de escritorios, sillas y gabinetes de madera y acero, junto con ordenadores y monitores.

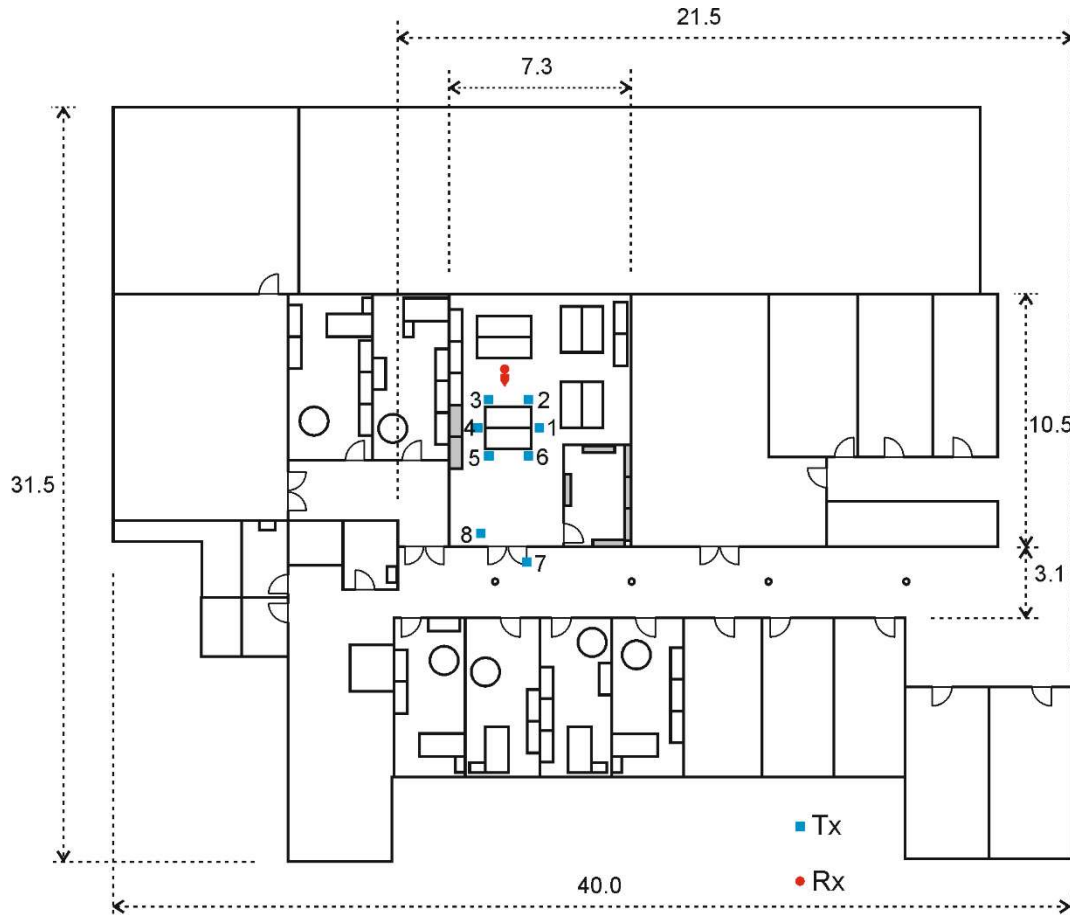


Figura 4.2 Entorno de medida e identificación de transmisores y receptor

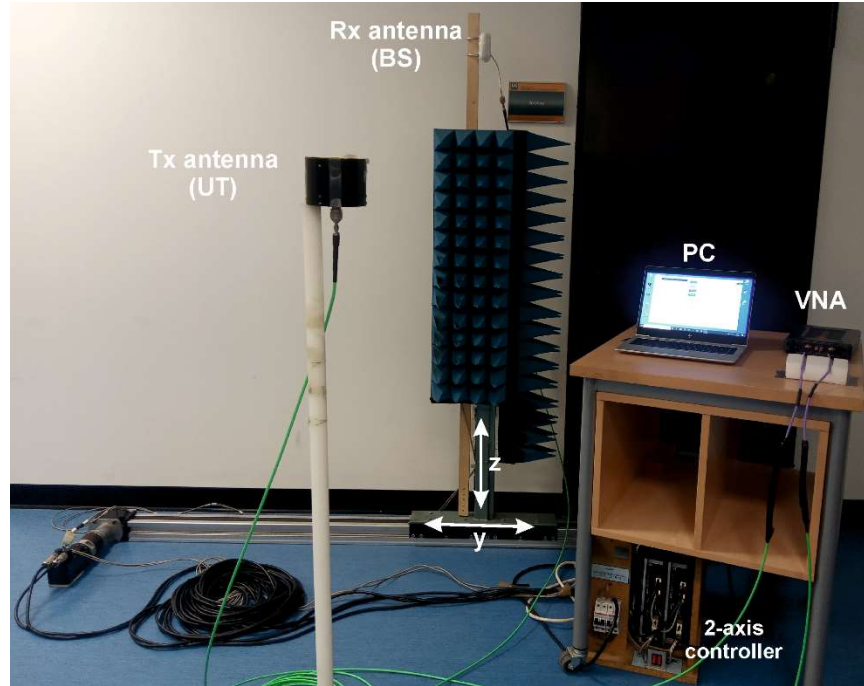
En la **Figura 4.2**, también se aprecia la disposición de los elementos radiantes, ya sean transmisores (TX) o receptor (RX). En este punto, hay que destacar que el estudio y las medidas se centrarán en emular el enlace ascendente (UL) de una posible picocelda de interior. En el extremo receptor, en el que se ubicará el escáner plano para emular el array virtual, la flecha indica la dirección de broadside de la antena. En el caso de los transmisores estos están señalizados de color azul y numerados, situados mayormente en el interior de la estancia.

Centrando el estudio en medidas MIMO masivo concentrado, se considera un array receptor virtual de 8x8 elementos, que se ha ubicado en el interior de uno de los laboratorios de simulación del edificio, con una altura central del array de $h_r = 1.4$ m.

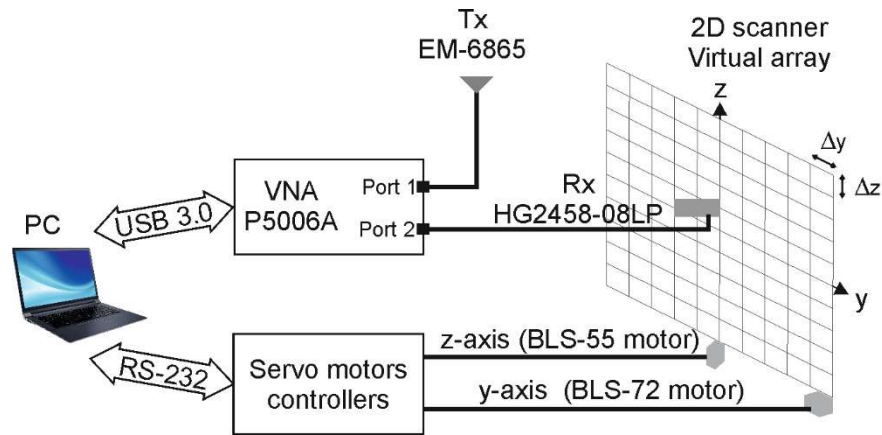
En lo que respecta a la colocación de los elementos radiantes que harían las veces de usuarios móviles, se han considerado ocho posiciones potenciales de transmisión (Tx), mezclando dos condiciones de propagación de canal bien diferenciadas; algunos de ellos están en condiciones LOS, es decir, T1, T2, T3, T4, T5, T6 y T8, y en el caso de T7 está en condiciones NLOS. En este caso, la antena

Tx se coloca a una altura que coincide con la central del array receptor, esto es $h_t = h_r = 1.4$ m.

Una representación de todos los dispositivos que se emplean en la campaña de medida se ilustra en la **Figura 4.3**.



(a)



(b)

Figura 4.3 Esquemático de la sonda de canal. (a) Identificación de los elementos que integran la sonda de canal, (b) Diagrama de bloques del sistema de medida.

Como complemento a lo expuesto en los párrafos anteriores, el resumen de los principales parámetros en cuanto a la disposición de los puntos de medida (Tx o usuarios), detalles del array virtual (AV) y altura de las antenas, se presentan en la **Tabla 4.1**.

Tabla 4.1 Parámetros del array concentrado C-mMIMO

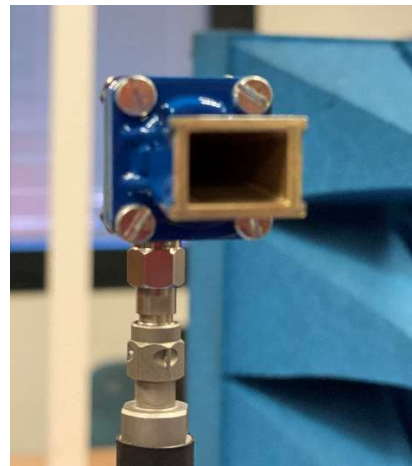
Tamaño del AV ($y \times z$)	8×8							
Separación entre elementos $\Delta y = \Delta z$ (mm/λ)(24.5 GHz)	20							
Área total del AV (m^2)	0.0196							
Altura antena receptora (centro del AV) $h_r(m)$	1.4							
Altura antena transmisora (usuarios) $h_t(m)$	1.4							
Distancia entre Tx y la apertura de la antena receptora (m)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
	2.21	1.505	1.305	2.215	3.37	3.16	7.8	6.45

4.3 Características de los elementos radiantes

Se han utilizado dos tipos de antenas, una de ellas de tipo bocina piramidal (ver **Figura 4.4**), que es el caso de la antena de recepción cuya posición cambia según el punto del array donde se encuentre mediante el movimiento del escáner plano. Para el caso de transmisión, se emplea una antena omnidireccional de banda ultra ancha (ver **Figura 4.5**) y cuyas principales características se resumen en la **Tabla 4.2**. Centrando el estudio en el UL, esta antena emula la posición de usuario en cada uno de los puntos marcados en azul según la **Figura 4.2**.



(a)



(b)

Figura 4.4 Antena de bocina receptora vista desde distintos ángulos. Antena de bocina piramidal de Pasternack con guía WR-34 que trabaja en el rango 22-33 GHz [3] y con una ganancia nominal de 10 dBi.

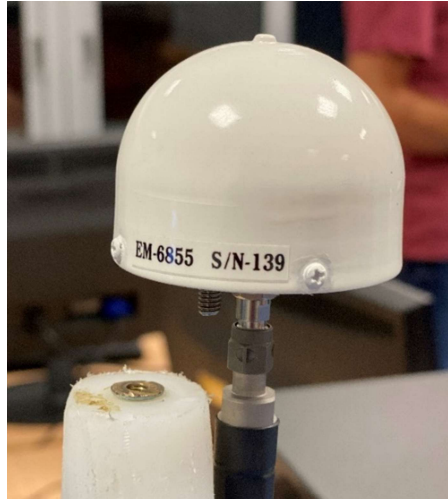


Figura 4.5 Antena omnidireccional transmisora de banda ultra ancha (4.5-40GHz) con polarización vertical, modelo EM-6855 de Electrometrics [4]

Tabla 4.2. Características de la antena en transmisión

Rango de frecuencias	4.5 - 40 GHz	VSWR en el peor caso	<2.0:1
Polarización	Vertical	Ganancia media	0 dBi (típica)
Impedancia de salida	50 Ω (nominal)	Conector	Tipo K hembra
VSWR típica	<1.7:1	Potencia de continua	-

Estas antenas vienen alimentadas por un cableado específico que parte de ellas y alcanzan al analizador de redes VNA P5006A. Se trata de un cable coaxial con conector SMA de precisión, en concreto el modelo TESTPRO5 de Radiall, y el cual podemos observar en la **Figura 4.6**. En el laboratorio disponemos de dos secciones de cable, uno de ellos conectado al puerto 1 del analizador de redes hacia la antena de transmisión (Tx) con una longitud de 5 m y el otro está conectado al puerto 2 del analizador hacia la antena receptora (Rx) con una longitud de 10 m. Las características más relevantes de este cable coaxial se resumen en la **Tabla 4.3**.



Figura 4.6 Cable coaxial de Radiall TestPro5 con SMA de precisión

Tabla 4.3 Características del cable coaxial de Radiall TestPro5 con SMA de precisión

Impedancia característica	50 Ω
Máxima frecuencia de operación	26.5 GHz
Atenuación	1.28 dB (10 m) ; 1.32 dB (5m)
Máxima VSWR	1.27 dB @ 26.5 GHz
Máximas pérdidas de retorno	18.5 dB @ 26.5 GHz

4.4 Parámetros de las medidas

En las campañas de medida hemos tenido en cuenta dos situaciones de trabajo, una serie inicial de puntos en condiciones LOS y en las inmediaciones de la antena receptora (T1 a T6 y T8 en la Figura 4.2) y un punto en el exterior de la sala con una obstrucción parcial por parte de la puerta exterior y que nos permitirá analizar lo que pasa en condiciones NLOS (T7 en la Figura 4.2).

Las mediciones se han realizado en el rango de frecuencia de 24.25 a 24.75 GHz, que contiene la subbanda comentada anteriormente considerada para las implementaciones actuales de redes 5G. Con respecto a la traza S_{21} para las medidas LOS, se consideraron $N_f = 1601$ tonos de frecuencia, $\Delta f = 312.30$ kHz uniformemente espaciados en los 500 MHz considerados. La resolución de frecuencia Δf conduce a una distancia máxima observable de 960 m aproximadamente (expresada como $c_0 / \Delta f$, en la que c_0 representa la velocidad de luz en espacio libre), por lo que las contribuciones de trayectos múltiples se consideran adecuadamente ya que al estar en un entorno indoor, estas contribuciones no llegan a alcanzar tal recorrido. En el caso NLOS, se consideraron $N_f = 801$ tonos de frecuencia, $\Delta f = 624.22$ kHz, este es un caso particular ya que mediremos el canal en las peores condiciones posibles.

En lo que respecta al VNA, los principales ajustes se resumen en la **Tabla 4.4** para ambas configuraciones. Un ancho de banda del filtro de frecuencia intermedia (IF) de 100 Hz es uno de los parámetros ajustados para mejorar el rango dinámico y junto con $N_f = 1601$ en el caso de la configuración LOS logran una compensación adecuada entre el tiempo de adquisición y rango dinámico para todo el conjunto de transmisores. En el caso NLOS (T7), ya que las condiciones son más desfavorables se ha considerado reducir el ancho de banda del filtro a 50 Hz tomando menos puntos y compensando así el tiempo de adquisición para poder trabajar con un mayor rango dinámico.

Otro de los parámetros a ajustar es el *dwell time*, que en el caso de dispositivos eléctricamente “largos”, puede resultar crítico. Este parámetro es el tiempo desde que se sintoniza un tono en el puerto 1 hasta que se toma la muestra en el puerto 2 del VNA. A la hora de configurar este parámetro para sondear el canal, podemos considerar el canal como un dispositivo eléctricamente grande por lo cual lo que interesa conocer es el retardo que se produce en ese dispositivo para la sincronización y captura de las medidas. Si consideramos que nos encontramos en un entorno de interior, hay que tener en cuenta cuanto multicamino se quiere considerar porque los caminos recorridos serán muy cortos además de todo el camino que ha de recorrer la señal, considerando tanto el cableado como el canal en sí. Considerando un cableado de 15 m en total y el multicamino que nos podemos encontrar en la sala podemos asumir unos retardos de propagación máximos de 1 μ s.

Finalmente, y antes de cada sesión de medición, el VNA ha sido correctamente calibrado en los extremos de los cables de radiofrecuencia, por lo que el S_{21} medido tiene en cuenta el efecto conjunto de canal y antenas, que representa el canal de radio.

Tabla 4.4 Resumen de los principales parámetros de configuración del VNA

	LOS	NLOS
Rango de frecuencia (GHz)	24.25-24.75	24.25-24.75
Tonos frecuenciales, N_f	1601	801
Resolución frecuencial, Δf (kHz)	312.30	624.22
Potencia en el puerto 1 del VNA (dBm)	10	5
Ancho de banda de IF (Hz)	100	50
Dwell time (μ s)	1	1
Movimiento del scanner	Y constante	Y constante
Rango de medida en el eje x (mm)	-70:20:70	-70:20:70
Rango de medida en el eje y (mm)	-70:20:70	-70:20:70
Tiempo de estabilización (s)	1	1

4.5 RESULTADOS: LOS

Para el escenario presentado en la **Figura 4.2**, en esta sección se incluyen los resultados más significativos obtenidos considerando las posiciones de los transmisores en condiciones LOS. Se realizará un análisis de los resultados en

cuanto a sus perfiles de potencia retardo, ancho de banda de coherencia, el retardo que se experimenta el canal y la capacidad que se obtiene del mismo. Para el procesamiento de las medidas se ha empleado un software que es capaz de obtener este tipo de parámetros. Este software está desarrollado en MATLAB por el grupo de investigación GISAR. Aunque no se desarrollará en detalle el funcionamiento de este programa, ya que se sale de las competencias de este trabajo, se ilustra en la **Figura 4.7** la interfaz de usuario de la aplicación.

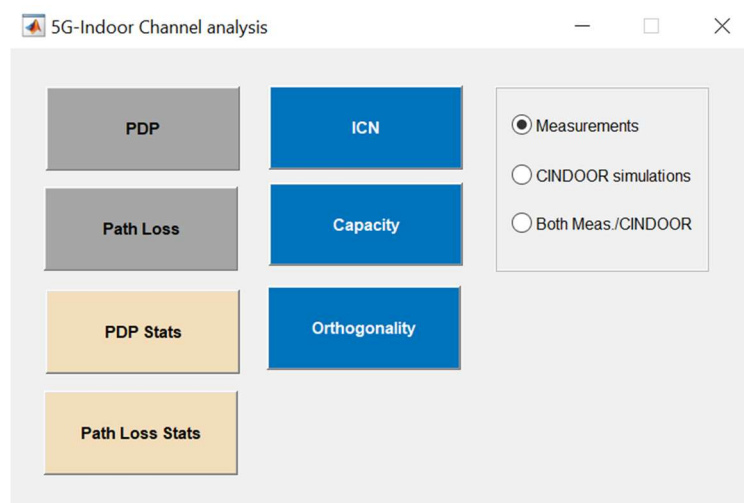
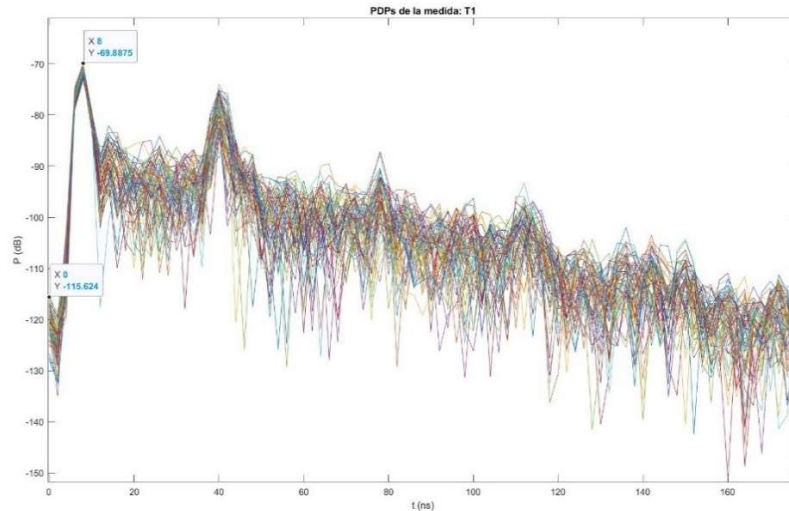


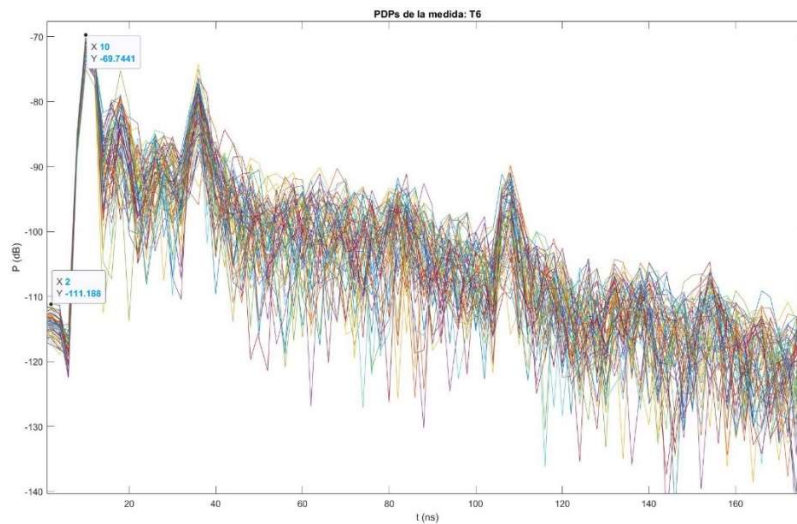
Figura 4.7 Interfaz de usuario de la aplicación para el procesamiento de medidas

4.5.1 Perfil potencia retardo y estadísticos asociados

Para una correcta caracterización estadística del canal, lo primero que debemos realizar en base a las medidas con respecto a estadísticos de banda ancha es analizar el rango dinámico, es decir, discernir dónde está el ruido de fondo para poder filtrar los PDPs y, del mismo, sacar información de la dispersión del retardo, la dispersión temporal del canal y el ancho de banda de coherencia. Para ello se han considerado dos de los puntos más desfavorables para la propagación, como serían T1, que en este caso está un poco más desplazado lateralmente respecto a la dirección de broadside de la antena del array y T6, que es el más alejado en esa primera isla de puntos en las inmediaciones del VA. Los PDPs para los 64 elementos del array en cada caso, se muestran en la **Figura 4.8**.



(a)



(b)

Figura 4.8 Análisis del rango dinámico en los casos más desfavorables en LOS. (a) PDP para el punto T1, con un rango dinámico de 45.7 dB, (b) PDP para el punto T6, con un rango dinámico de 41.4 dB

Por inspección de los 64 PDPs, tanto para el del transmisor 1 como para el caso del transmisor 6, más o menos el rango dinámico desde la llegada del rayo directo hasta el ruido de fondo previo está en torno a los 40-45 dB. Así analizadas todas las situaciones se considera un threshold (TH) para analizar los parámetros de 35 dB.

Una vez que se ha decidido el umbral de decisión para filtrar los PDPs, el siguiente paso es analizar PDPs normalizados filtrados con este threshold para los diferentes transmisores o posiciones de usuarios, los cuales se resumen en la **Figura 4.9**.

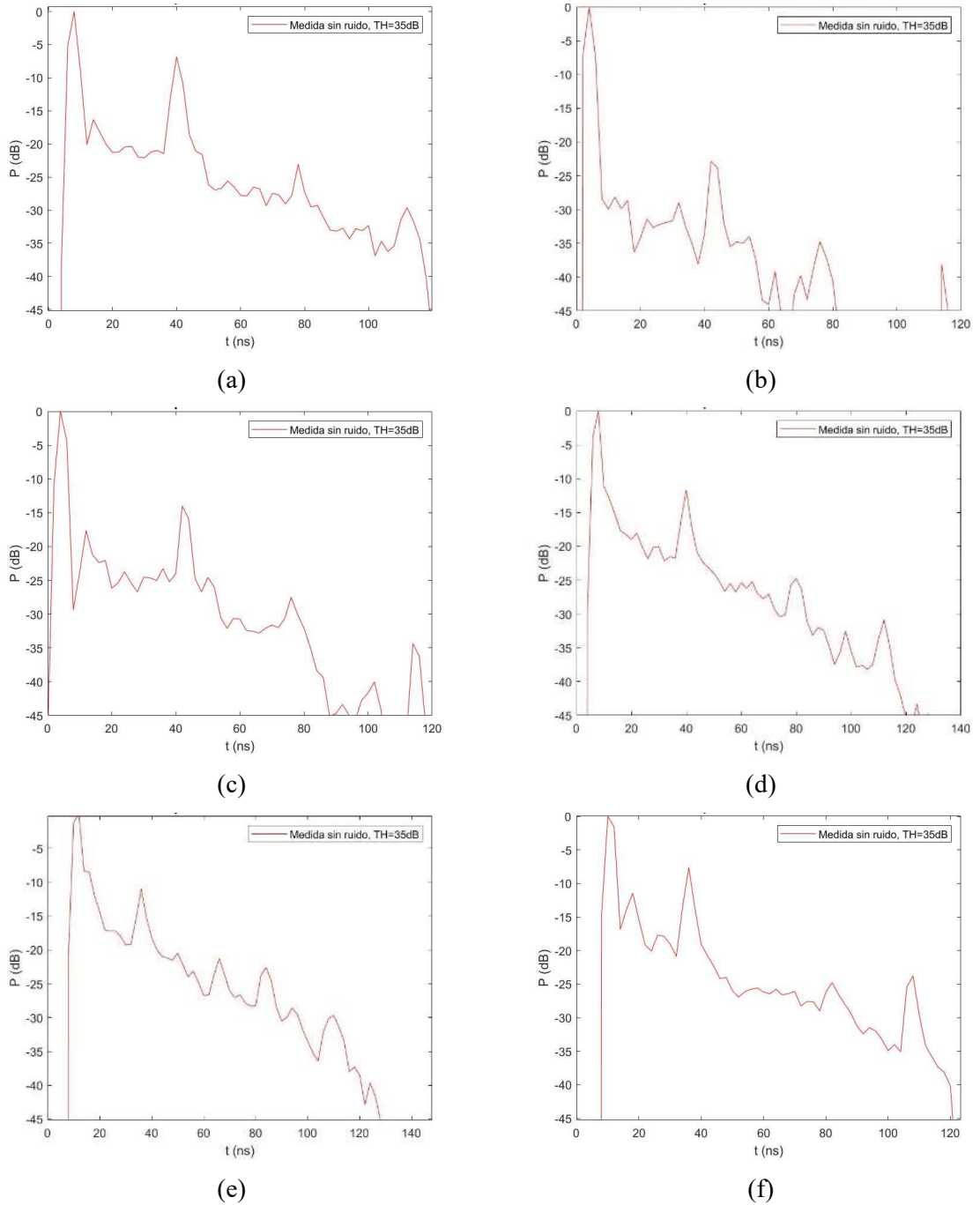


Figura 4.9 PDPs normalizados filtrados con un $TH=35$ dB. (a) PDP del transmisor 1, (b) PDP del transmisor 2, (c) PDP del transmisor 3, (d) PDP del transmisor 4, (e) PDP del transmisor 5, (f) PDP del transmisor 6.

En base a la disposición transmisor-receptor según se representan en la **Figura 4.2**, se puede intuir que hay varias componentes del multicamino dominantes que se atribuyen a la interacción de orden superior con las puertas de doble refuerzo metálico y con los armarios metálicos que se encuentran presentes en el laboratorio en que se están realizando las medidas. Como también se puede observar, lo primero que obtenemos es el haz del rayo directo junto con otras componentes multicamino que son captadas a posteriori. Se aprecia que esta

primera componente que se observa es el haz principal ya que en cada uno de los casos de transmisión este posee un retardo u otro, esto es debido a que la posición del transmisor como ya sabemos es distinta. Existen otros elementos en la estancia como se ha comentado anteriormente que también pueden y de hecho están influyendo en la llegada de estas componentes de orden superior, como pueden ser, las torres de los ordenadores que son metálicas y algún que otro objeto de estas características.

Para caracterizar estadísticamente el canal, una vez se ha realizado el análisis de los PDPs, el siguiente paso es realizar un análisis de la dispersión del retardo (τ_{RMS}) y del ancho de banda de coherencia. La estadística de estos parámetros se resume en la **Figura 4.10** y **Figura 4.11**. Es necesario recordar que el coeficiente de correlación es una medida estadística de la separación máxima en frecuencia en la cual se ha comprobado que el canal tiene aproximadamente la misma ganancia y un incremento de fase lineal.

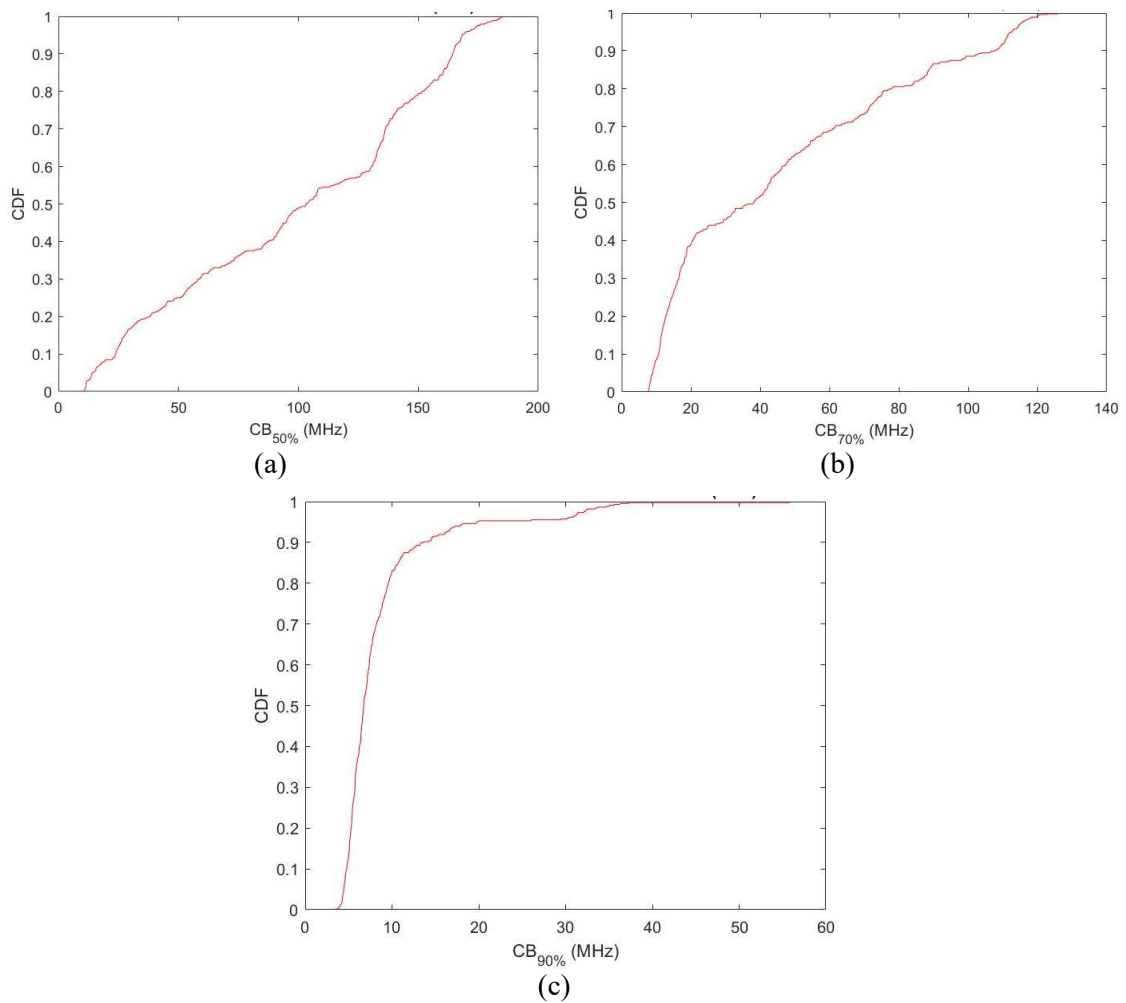


Figura 4.10 Función de distribución acumulada (CDF) del ancho de coherencia del canal con distintos factores de correlación (a) B_C (0.5), (b) B_C (0.7) y (c) B_C (0.9).

Aplicando al PDP la Transformada de Fourier se obtiene la función de autocorrelación. De ésta se pueden obtener distintos anchos de Banda de Coherencia, a distintos grados de correlación como se observa en la figura anterior. Dicho parámetro está relacionado inversamente con el RMS Delay Spread como se ha explicado en capítulos anteriores. Gracias al conocimiento de éste, es posible saber la selectividad frecuencial que la señal está sufriendo en el canal, es decir, como atenúa el canal a la señal en las distintas bandas frecuenciales.

Es bien sabido que la dispersión temporal producida por el canal da lugar a su selectividad en frecuencia.

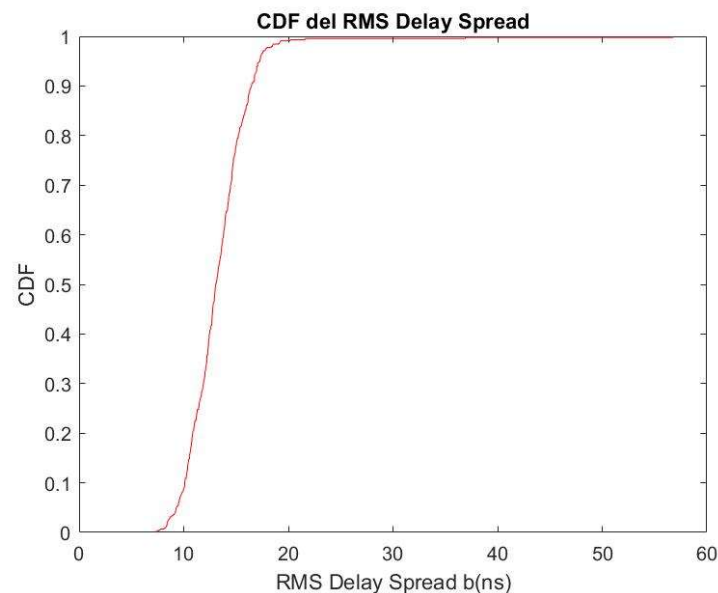


Figura 4.11 CDF del τ_{RMS} Delay Spread del canal

En este entorno la dispersión temporal varía entre 8 y 17 ns lo que nos da una idea clara de cuál es el retardo del canal en condiciones favorables.

4.5.2 Análisis de la capacidad de canal

Tal y como se comentó en el capítulo 2, la capacidad indica la máxima cantidad de bits transmisibles por uso de canal, que en este caso nos referimos a unidad de tiempo y frecuencia para un medio. Este análisis se centrará en la normalización del umbral elegido, normalización por usuario. Para ello, una solución muy ingenieril sería seccionar en diferentes situaciones para poder observar con influyen cada uno de los transmisores y cuál sería su capacidad en

el enlace ascendente según un modelo estadístico. Para incluir la mayoría de los casos posibles se realiza en primer lugar un análisis de grupos de pares de transmisores, luego de tríos de transmisores y por último la contribución de cada uno de ellos. Una de las estrategias a seguir es buscar grupos en los que se pueda observar la diferencia de capacidad siempre comparando con la capacidad que nos brindaría un canal Rayleigh ideal considerando una relación señal a ruido típica de 10 dB. Las configuraciones propuestas se resumen en la **Tabla 4-5**.

Tabla 4-5 Configuraciones propuestas para el análisis de la capacidad del canal

3 grupos de pares conectados	T1-T3, T1-T4 y T2-T5
3 grupos de tríos	T1-T2-T3, T4-T5-T6 y T1-T3-T5
Todos los transmisores	T1-T2-T3-T4-T5-T6

A continuación, se ilustran los resultados obtenidos de las configuraciones anteriores en la **Figura 4.12**, **Figura 4.13** y **Figura 4.14**.

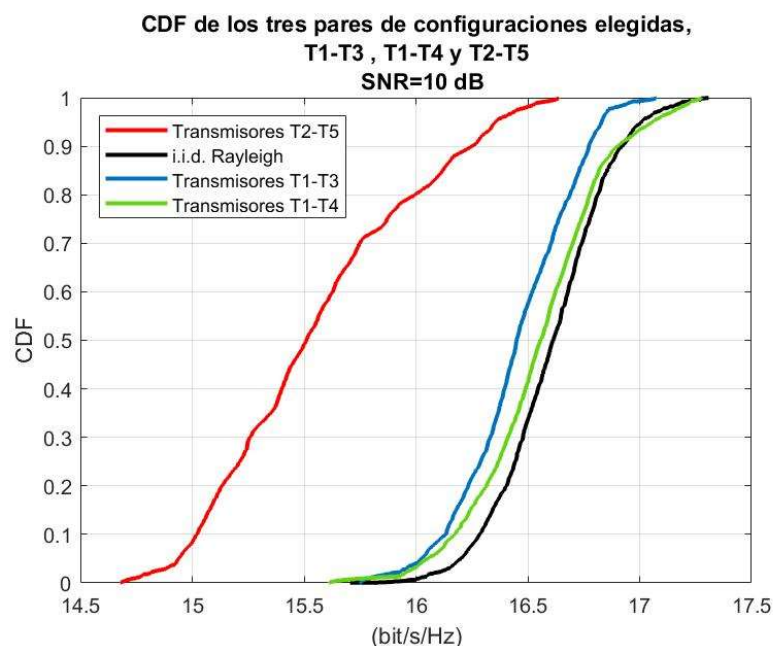


Figura 4.12 CDF de la capacidad de los tres pares de configuraciones elegidas, T1-T3, T1-T4 y T2-T5 con respecto a la capacidad de un canal Rayleigh.

En la figura anterior se deduce que el grupo que menos prestaciones tiene con respecto a capacidad es el grupo de transmisores T2-T5, si bien es cierto, es lo esperado, ya que es el grupo que peor se sitúa frente al receptor, sobre todo el transmisor T5 consiguiendo maximizar la eficiencia del canal a unos 16.5 bit/s/Hz. Por otro lado, los grupos T1-T3 y T1-T4 pueden alcanzar capacidades más altas, siendo el grupo T1-T4 ligeramente superior,

asemejándose mucho a la curva de un canal ideal Rayleigh. Esto no es de extrañar, ya que la disposición de estos les es muy favorable con respecto al transmisor.

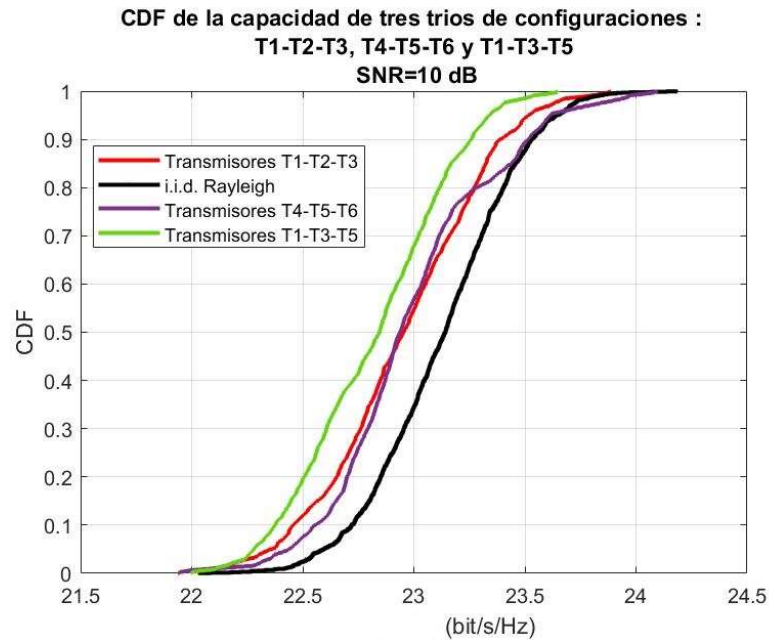


Figura 4.13 CDF de la capacidad de los tres tríos de configuraciones elegidas, T1-T3-T5, T1-T2-T3 y T4-T5-T6 con respecto a la capacidad de un canal Rayleigh.

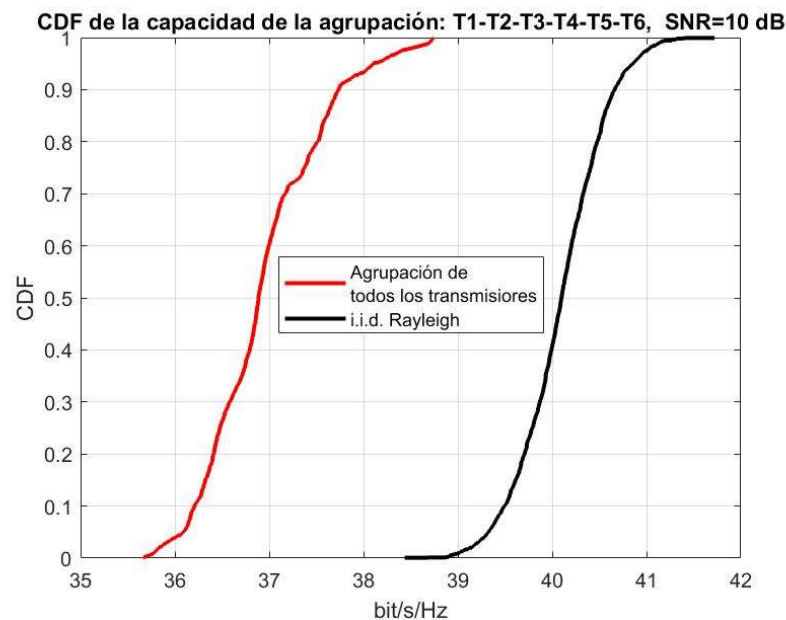


Figura 4.14 CDF de la capacidad del canal con los transmisores T1-T2-T3-T4-T5 y T6 con respecto a la capacidad de un canal Rayleigh.

En el caso de estas últimas dos configuraciones, existe una notable diferencia. En la configuración de los tríos, podemos ver que se alcanzan capacidades muy parecidas, en torno al valor ideal del canal Rayleigh, sin embargo, el peor caso se lo lleva el grupo T1-T3-T5, y esto no es de sorprender ya que es el grupo más diferenciado en cuanto a posición se refiere pudiendo alcanzar una capacidad máxima de hasta 23.5 bit/s/Hz por uso de canal. Con respecto a la configuración en la que se encuentran disponibles todos los transmisores el canal les ofrece una capacidad aproximadamente de 3 bit/s/Hz (por uso de canal) menos de la ideal.

4.5.3 Eficiencia espectral

Estableciendo como referencia los resultados correspondientes a la normalización por usuario, se estudiará la eficiencia ligada a cada transmisor y la eficiencia espectral colectiva. En conclusión, la situación ideal se podría definir al lograr que la eficiencia espectral del sistema, resultado de la suma de la eficiencia que observa cada individuo y equivalente a la del resto de los usuarios, fuese idéntica a la capacidad teórica de Rayleigh, sustituida en el análisis por la correspondiente a la normalización por UE. Sin embargo, y ante la imposibilidad de alcanzar tanto los resultados teóricos como de garantizar las mismas condiciones espaciales, frecuenciales y temporales para todos los usuarios, será necesario examinar los aspectos relativos a la ubicación y número de dispositivos activos para clarificar el comportamiento del sistema. A continuación, se recoge el planteamiento propuesto para estudio. Considerando una SNR de 10dB como en los anteriores análisis, en la **Figura 4.15** se representan CDF de las deficiencias individuales de cada transmisor por separado seguidamente la CDF de la eficiencia suma de las eficiencias individuales con respecto a la ideal en la **Figura 4.16**

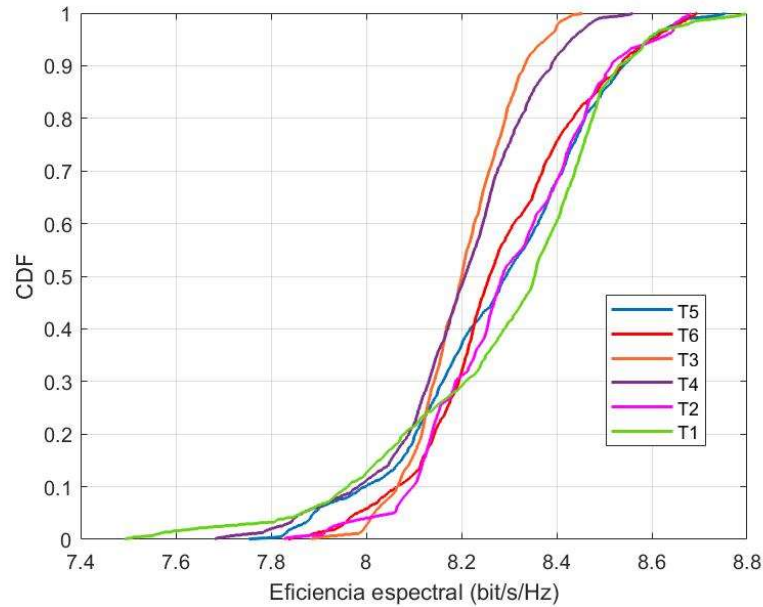


Figura 4.15 CDF de la eficiencia espectral individual de los transmisores.

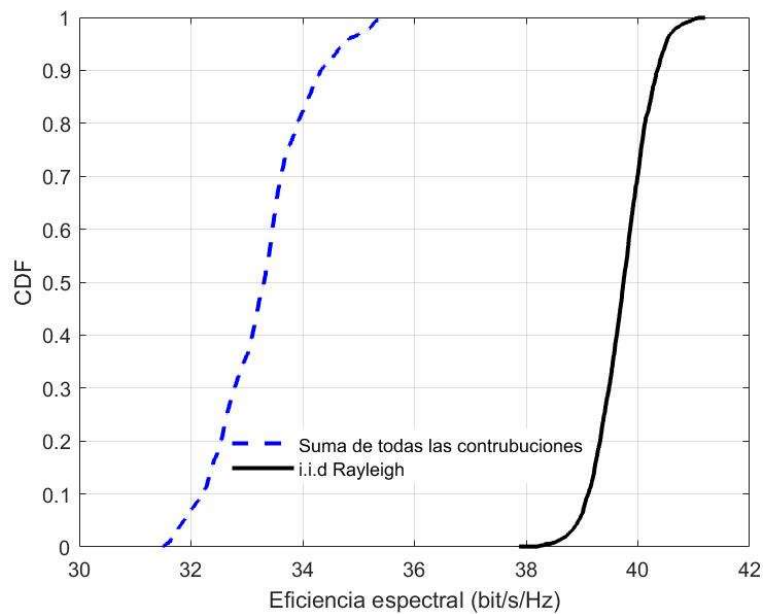


Figura 4.16 CDF de la eficiencia espectral suma de los transmisores.

A pesar de las diferentes configuraciones respecto a la distancia entre los transmisores y el receptor, distancias entre transmisores y su disposición en el entorno, podemos destacar una gran similitud entre sus eficiencias espectrales. Para todos los transmisores, los valores de eficiencia son superiores a 7.5 bit/s/Hz, situando a T1 como el transmisor que mayor rango absorbe, ya que parte de los 7.5 a los 8.8 bit/s/Hz. Como era de esperar la mejor contribución fue la del transmisor T2 por su posición privilegiada frente al receptor.

Aunque por si sola la eficiencia espectral total no es un indicador de la homogeneidad del sistema, ya que podría haber desigualdades considerables entre usuarios, comparada con la ideal, nos brinda una idea del sistema global. En este caso existe una diferencia de 6.2 bits/s/Hz con respecto a la Rayleigh. Esto es algo notable ya que la disposición no es tan abrupta, pero al ser una componente suma puede que algunas contribuciones afecten negativamente y es por ello esa diferencia.

4.6 RESULTADOS: NLOS

En esta sección centraremos el estudio en la capacidad de la sonda para realizar medidas en la banda de 26 GHz pero en condiciones más desfavorables, ciñendo el estudio a la posición T7 de la Figura 4.2, en condiciones NLOS con respecto al array virtual receptor. El análisis de la contribución de este elemento al modelado estadístico del canal seguirá los mismos pasos que en la sección anterior.

4.6.1 Perfil potencia retardo (PDP) y estadísticos asociados en NLOS

Los PDPs para los 64 elementos del array para el transmisor T7 se muestran en la **Figura 4.17**.

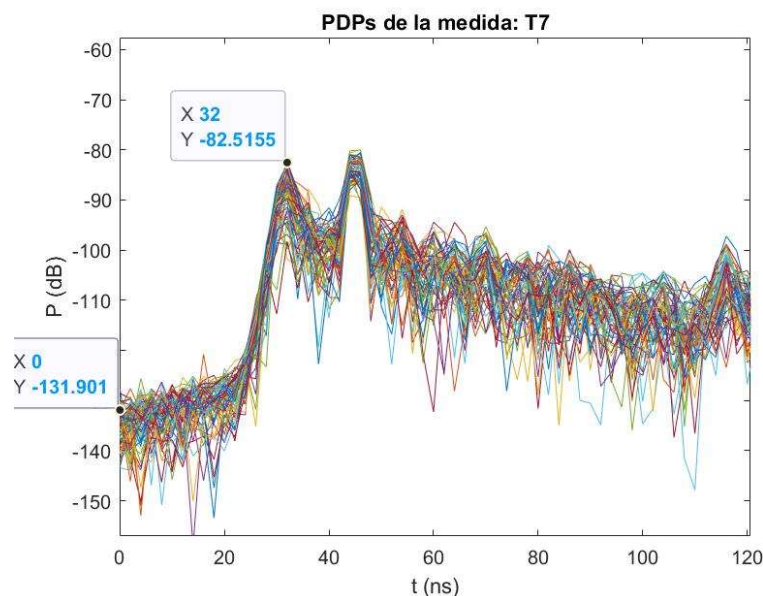


Figura 4.17 Análisis del rango dinámico en NLOS del punto de medida T7

Analizando en detalle los PDPs, podemos afirmar que tenemos en este caso que emplear el mismo umbral para poder hacer comparaciones con el resto de medidas sin apreciar ruido de fondo empleando un rango dinámico de 35 dB aproximadamente. Con esta evaluación el siguiente paso es filtrar y promediar los PDPs, obteniendo el resultado que se representa en la **Figura 4.18**.

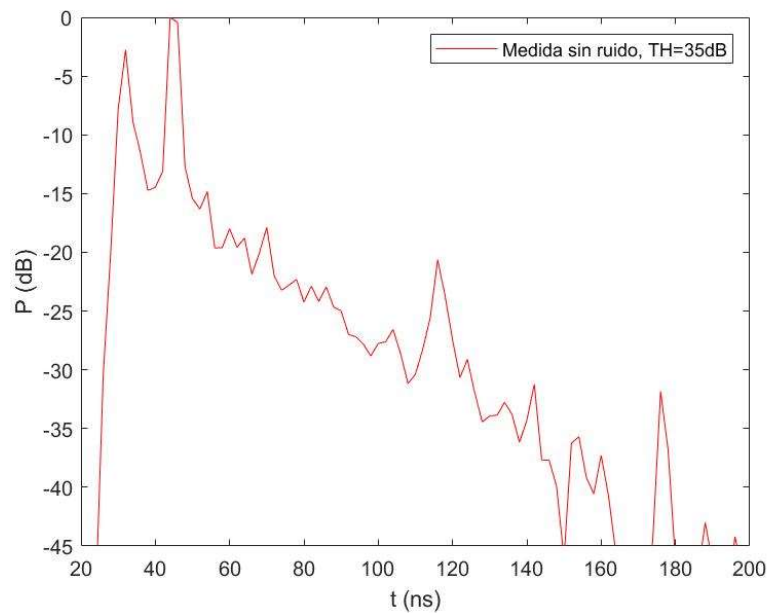


Figura 4.18 PDP normalizado del transmisor 7

Como ya se ha mencionado, este caso es muy particular, aquí no existe visión directa, las componentes multicamino más fuertes que se pueden ver son principalmente dobles o triples reflexiones sobre la puerta metálica que conecta la estancia de medida con el pasillo en el que se encontraba.

A continuación, pasamos a analizar los parámetros de ancho de banda de coherencia y dispersión temporal. En la **Figura 4.19** se representan las funciones de distribución acumulada o CDFs del ancho de banda de coherencia que presenta el canal para los distintos factores de correlación.

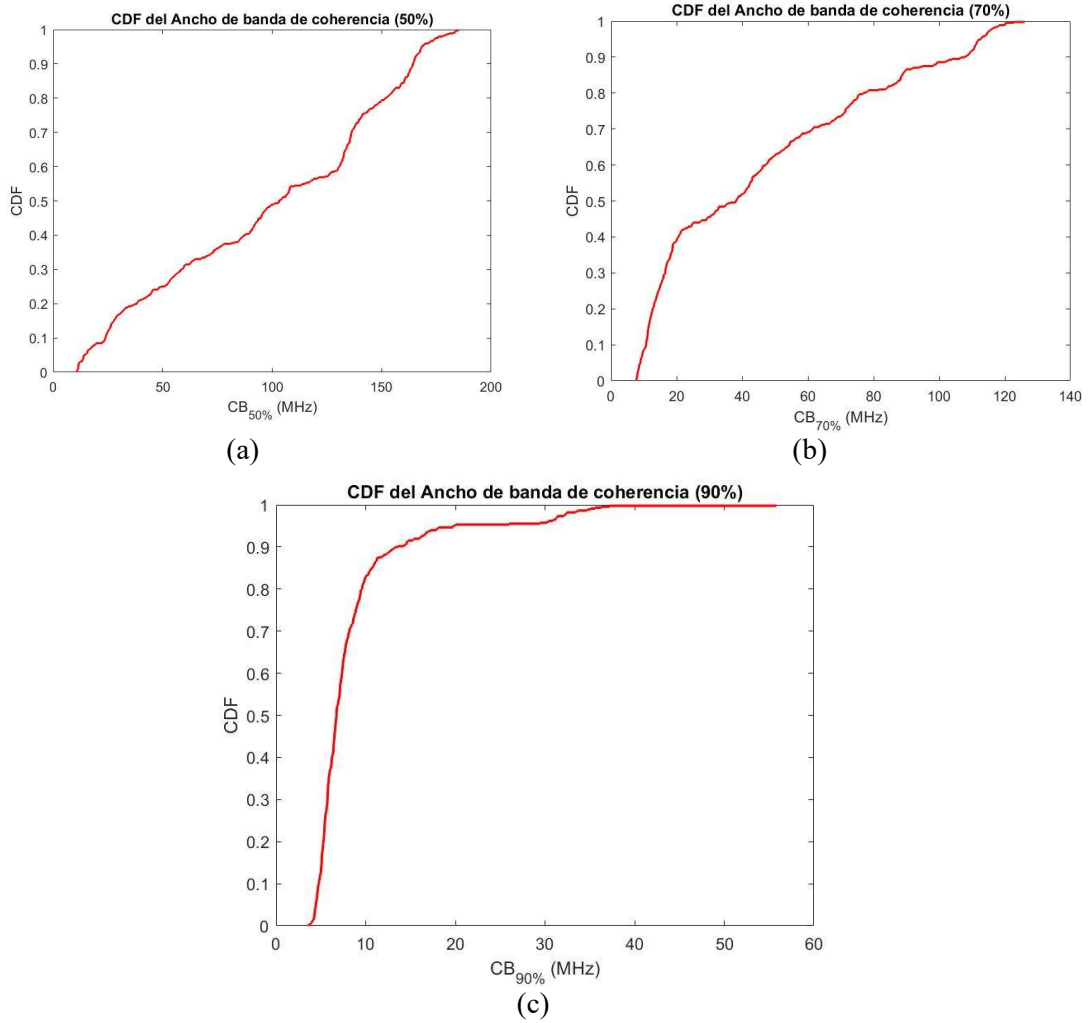


Figura 4.19 CDF del ancho de coherencia del canal con distintos factores de correlación teniendo en cuenta la nueva situación NLOS. (a) $B_C(0.5)$, (b) $B_C(0.7)$, (c) $B_C(0.9)$.

En este caso y fijándonos en resultados previos con visión directa, podemos ver que el ancho de banda de coherencia disminuye como era de esperar. Si nos fijamos al 10% se les asigna un ancho de banda de coherencia de 5 MHz aproximadamente mientras que hay casos donde este rango puede oscilar entre 9 y 35 MHz para el mejor caso.

El siguiente paso es analizar la dispersión temporal del canal a partir de los valores que toma el τ_{RMS} . La CDF de este parámetro se representa en la **Figura 4.20**.

Si hacemos una comparativa entre la contribución NLOS y el escenario LOS, tal y como se representa la **Figura 4.21**, podemos ver que las contribuciones NLOS tienen mayor dispersión temporal que las LOS como era de esperar siempre teniendo en cuenta que estos transmisores están muy cercanos y lo único que le diferencia es la disposición de su entorno.

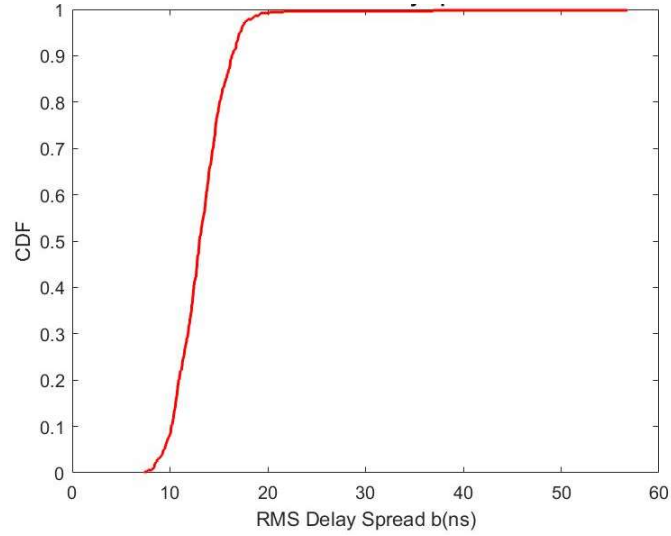


Figura 4.20 CDF del τ_{RMS} teniendo en cuenta la contribución del T7 en NLOS

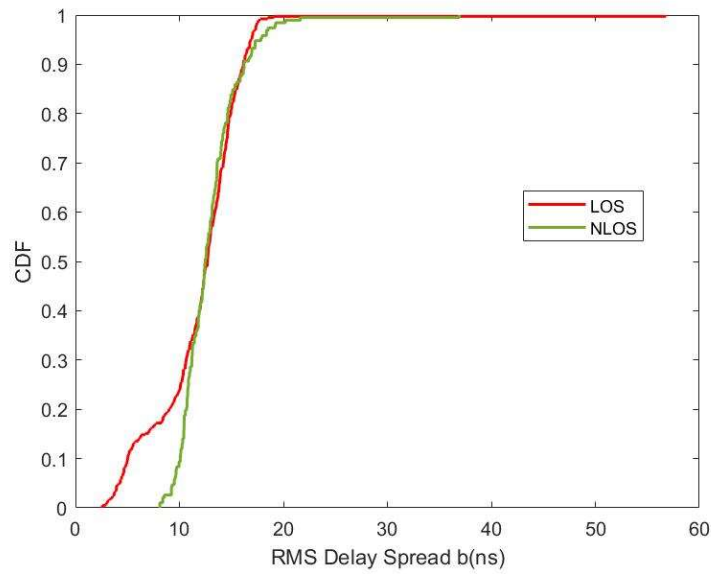


Figura 4.21 Comparación entre CDF del τ_{RMS} Delay Spread del canal con distintas contribuciones tanto LOS como NLOS.

4.6.2 Capacidad del canal

Para realizar este análisis lo veremos desde dos perspectivas, la primera de ellas será comparando los entornos más desfavorables hasta el momento, es decir el transmisor NLOS T7 y otro transmisor T8 muy alejado del receptor, pero con visión directa LOS y a su vez también compararemos el resultado del entorno LOS visto en la sección anterior con la capacidad que se obtenga del anterior análisis. Para proceder a este análisis se representan la **Figura 4.22** y **Figura 4.23**.

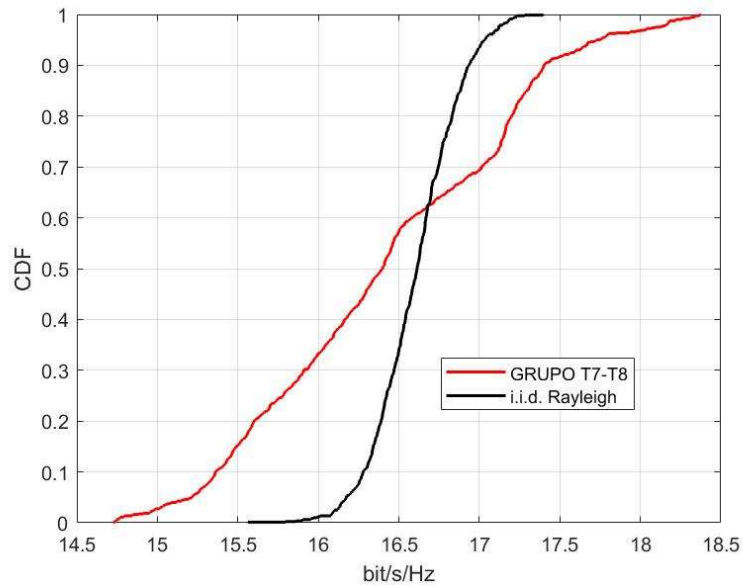


Figura 4.22 CDF de la capacidad los transmisores más desfavorecidos T7-T8 con respecto a la capacidad de un canal Rayleigh.

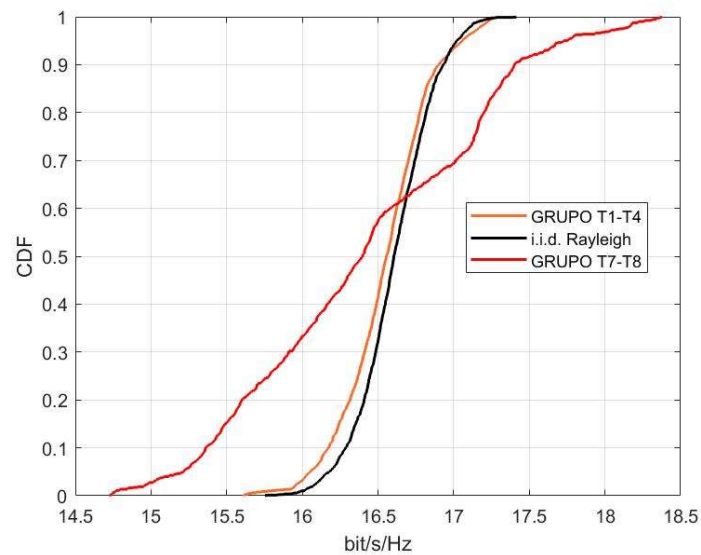


Figura 4.23 Comparación de CDF de la capacidad que ofrece el canal entre el grupo más favorecido LOS con respecto al grupo menos favorecido en transmisión

Como se puede apreciar se observa una clara obstrucción de la capacidad como era de esperar en los grupos menos favorables en cuanto a su disposición diferenciándose en hasta 1 bits/s/Hz. Aunque este dato puede resultar chocante, pero hemos de recordar que los transmisores no están tan alejados y por lo tanto la diferencia no es tan abrupta.

4.7 CONCLUSIONES

En este capítulo se han presentado los resultados obtenidos de una campaña de medidas realizada en un entorno de interior. El objetivo principal de esta campaña era testar la aplicación software modificada en el marco de este TFM y analizar la capacidad de realizar medidas con la sonda de canal en la banda de interés de los 26 GHz. Aunque las pérdidas de inserción de los cables de RF limitan en exceso las posibilidades de medida, los resultados obtenidos en términos de capacidad de canal y eficiencia espectral suponen un punto de partida de interés que permitirá en el futuro continuar con las tareas de caracterización del canal, elevando la complejidad a situaciones con distintos grados de obstrucción (NLOS) entre antenas y aumentando la distancia Tx-Rx, dado que las pruebas iniciales han demostrado que el rango dinámico es suficiente para poder hacerlo.

REFERENCIAS

- [1] «About RSPG,» [En línea]. Available: <https://rspg-spectrum.eu/>.
- [2] MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGIA Y TURISMO, «CONSULTA PÚBLICA SOBRE EL MODELO DE GESTIÓN DE LAS BANDAS DE FRECUENCIAS,» [En línea]. Available: <https://avancedigital.mineco.gob.es/es-es/Participacion/Documents/modelo-gestion-bandas-frecuencias.pdf>. [Último acceso: 17 05 2021].
- [3] PASTERNAK, «WR-34 UG-1530/U Square Cover Flange to 2.92mm Female Waveguide to Coax Adapter Operating from 22 GHz to 33 GHz,» [En línea]. Available: <https://www.pasternack.com/images/ProductPDF/PEWCA1001.pdf>.
- [4] ELECTRO-METRICS, «EM-6855 | Antenna, Omni Directional Wideband,» [En línea]. Available: <https://electro-metrics.com/wp-content/uploads/2016/12/6855-New.pdf>.

Capítulo 5: CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

Este trabajo de fin de máster (TFM) tiene como objetivo contribuir a la caracterización de canales MIMO masivo en entornos de interiores apoyándose en la mejora de una plataforma de medida de sistemas MIMO masivo concentrado y distribuido, y centrando el estudio en la banda de los 26 GHz, banda que estaba sin explorar por el grupo investigador receptor y cuyo uso para los futuros despliegue de redes de quinta generación (5G) será casi inminente. Con ello, se pretende ver cómo se comporta el canal radio para las comunicaciones 5G o futuras generaciones de sistemas de comunicaciones móviles en entornos de interiores.

La base fundamental de este trabajo se sostiene en la mejora y desarrollo de una aplicación que parte de la idea de poder realizar medidas de canal en entornos MIMO masivo. Remarcar que esta aplicación ya contaba con una base y lo que se ha introducido en este TFM es la posibilidad de realizar esas medidas con un nuevo dispositivo, en este caso el VNA P5006A, que es capaz de realizar las medidas pertinentes en la banda de estudio. Para ello ha sido necesario enfocarse y lidiar con varios aspectos de programación basados en MATLAB, cambiando la interfaz gráfica final de usuario, agregando funciones para la comunicación de los dispositivos (drivers, etc), tratando de evitar o cambiar la base ya existente. De este modo, se han tenido que superar problemas de programación con la comunicación de objetos y estructuras, realización de funciones que soporten manejo de distintos formatos de datos y paralelizar el sistema de modo que no se pueda apreciar la complejidad que subyace de cara al usuario final que realice las medidas.

Una vez conseguido esto el siguiente paso natural ha sido comprobar si el sistema funciona correctamente. Para ello se realizó una pequeña campaña de medidas que permitió verificar el correcto funcionamiento de la sonda de canal. En esta campaña de medidas se buscaba encontrar un modelo estadístico empírico del canal a partir de figuras de mérito como pueden ser el perfil potencia-retardo, el ancho de banda de coherencia, el RMS delay spread, la capacidad o la eficiencia espectral que ofrece el canal.

Para ello se han dispuestos varias configuraciones en la que su base principal es modelar el canal para un enlace ascendente donde cada uno de los puntos de

medida representaría a usuarios o transmisores que intentan conectarse a una estación base. La primera de las configuraciones se trata de varios usuarios que intentan conectarse a esa estación base, teniendo condiciones más o menos favorables y línea de visión directa, mientras que la otra configuración son usuarios menos favorecidos para poder así comparar ambas situaciones.

Atendiendo al procesado de las medidas, el PDP refleja un comportamiento similar entre transmisores, aunque se debe indicar que tanto la distancia como la posición y el ángulo de incidencia de cada usuario o transmisor dan lugar a contribuciones del multicamino que presentan cierta variabilidad respecto a tiempos de recepción y potencia, además de los elementos metálicos que se encuentran en la estancia. Sobre todo, este último por el hecho de que las estancias estaban separadas por puertas y armarios metálicos por los cuales teníamos la presencia de componentes multicamino bastante pronunciadas. En cualquier caso, el 90% del tiempo, el RMS delay spread no supera los 20 ns incluso en los casos más alejados y con peores condiciones.

Respecto al ancho de banda de coherencia, se puede asumir que el canal es plano para anchos de banda de 40 MHz, aunque se podría asumir un ancho de banda de coherencia de entre 40 y 80 MHz teniendo en cuenta ambas configuraciones.

En relación con la capacidad, se ha planteado el análisis del entorno para distintas configuraciones de ubicación y número de transmisores activos. Respecto a la capacidad, la normalización por usuario es ligeramente superior que la global, con resultados más próximos a un canal ideal Rayleigh. Con respecto a la eficiencia espectral, se ha observado que los mejores resultados corresponden a los casos donde los usuarios se distribuyen mejor en cuanto al receptor y presentan condiciones similares respecto a la distancia y ángulo de incidencia.

5.2 Líneas futuras

Las líneas futuras que pueden establecerse para dar continuidad a este TFM pueden estar dirigidas a continuar con un posprocesado más exhaustivo en cuanto a la realización de un análisis estadístico del Path-loss. Uno de los problemas que nos encontramos al realizar las campañas de medida era el poco rango dinámico que teníamos en las medidas debido a las limitaciones de los cables de RF, ya que estos tenían una atenuación muy elevada por ello se propone de cara al futuro mejorar la sonda de medida con sistemas RF-Ópticos que

proporcionen mayor rango dinámico y por ende menores pérdidas. Si bien la caracterización realizada tiene carácter empírico, podría pensarse también en realizar esa misma caracterización del canal empleando simuladores para poder comparar los resultados. Para ello sería necesario emplear aplicaciones de trazado de rayos como por ejemplo CINDOOR, que es una aplicación que posee el grupo de investigación receptor a la cual se le puede añadir la aplicación diseñada.

Para concluir, aunque 5G esté cubriendo actualmente la mayoría de las necesidades tecnológicas y sociales, esta tendencia no dejará de aumentar, así como la implementación de nuevos servicios, mayores cargas de datos y menores latencias. Todo esto requerirá el uso de mayor ancho de banda, y para poder mantener los servicios actuales, es necesario que se suba en frecuencia y por lo cual, no es descabellado afirmar, que será necesario plantarse nuevas bandas de trabajo subiendo necesariamente en frecuencia.

Anexos

En esta sección se reflejarán algunas de las funciones que se han realizado para el correcto desarrollo de este trabajo. Es necesario tener en cuenta que para que los comandos que a continuación se resaltan se necesita tener acceso a distintas librerías proporcionadas por Keysight para acceder a los drivers y MATLAB en su toolbox de Instrument Control. Para más información acerca de estas librerías se puede consultar en [1] y [2].

Anexo 1: Funciones en la que se establece comunicación con el VNA P5006A para la obtención de los Calset y representación

En esta sección se establecen los principios básicos de programación mediante MATLAB para obtener los parámetros de calibración que se tengan establecidos en el analizador VNA P5006A, para ello se esbozan las siguientes algunas de las funciones mas relevantes para esta tarea (ver **Sección código 1** y **Sección código 2**)

Sección código 1 Función general para obtención de CalSets

```
function radiobutton_calset_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to radiobutton_calset (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
set(handles.radiobutton_parametros_medida, 'Value', 0); % desactivo el radio-button
parametros_medida
set(handles.radiobutton_calset, 'Value', 1); % activo el radio-button calset
global P5006A_S;
P5006A_S.activar_calset= 1; % 1 = Calset activado, 0 = Calset desactivado
% Se activan los elementos del panel de calset
set(handles.uipanel9, 'BackgroundColor', [0.251, 0.502, 0.502])
set(handles.Frequency1, 'BackgroundColor', [0.925, 0.914, 0.847])
set(handles.IFbw1, 'BackgroundColor', [0.925, 0.914, 0.847])
set(handles.fstart, 'Enable', 'Off') % Se desactivan las casillas de texto de
frecuencia_fija lista_frecuencia y traza
set(handles.fstop, 'Enable', 'Off')
set(handles.points, 'Enable', 'Off')
set(handles.IFbw, 'Enable', 'Off')

%Conexion con el equipo para obtener todos los calsets
%Connect steps
if (exist('AgNA_ivic.mdd', 'file') == 0)
    makemid('AgNA', 'AgNA_ivic.mdd', 'ivi-c');
end
global P5006A
P5006A = icdevice('AgNA_ivic', 'PXI10::0-0.0::INSTR');
connect(P5006A);

%Obtengo los calsets
```

```

[lista_calsets] = invoke(P5006A.Channelscalsets, 'calsetscatalog', 1024);

lista=split(lista_calsets,',');

if length(lista_calsets) > 0 % Detecta si hay algun calset definido en el analizador en
caso contrario sale del if

    calsets=lista;

else
    %No hay ningun calsets disponible

    calsets="";

end

set(handles.popupmenu9,'String', calsets); % se muestra en el popup_calset todas las
configuraciones representadas en 'texto'
P5006A_S.calsets_disponibles=calsets;

P5006A_S.calset_seleccionado=calsets(1);

mostrar_parametros_calset(hObject, eventdata,handles)

set(handles.popupmenu9,'Enable', 'On')

```

Nótese que la sección rodeada de color verde constituye las operaciones de establecimiento de conexión con el dispositivo, en la cual se crea un objeto que engloba todas las características del analizador. Lo primero que se realiza es la conversión de los drivers a el formato de instrumentación de drivers de MATLAB, en este caso este tipo drivers son de tipo IVI-C. Posteriormente se crea el objeto del dispositivo a partir del driver *AgNA_ivic* empleando la dirección física asignada al instrumento. El objeto asignado al dispositivo es *P5006A*. Dentro de esta estructura podemos encontrar atributos que nos permiten ajustar los parámetros del dispositivo tal y como se aprecia en *Sección código 2*.

Sección código 2 Función para el acondicionamiento de los parámetros obtenidos del Calset e interacción con el analizador

```
function mostrar_parametros_calset(hObject, eventdata,handles)

global P5006A_S% Abro los datos
global P5006A %Conexion con el analizador abierta

nombre_calset = P5006A_S.calset_seleccionado;

if length(nombre_calset) > 0
% Obtencion de los parametros
    invoke(P5006A.Channel, 'channelapplycalsetwithstimulus', 'Channel1',
char(nombre_calset)); % Configuro el equipo con el calset seleccionado
    % Pregunto al equipo los parametros del calset seleccionado
    P5006A.RepCapIdentifier = 'Channel1';
    fstart = P5006A.Channelstimulusrange.Start/1e9;
    P5006A.RepCapIdentifier = 'Channel1';
    fstop = P5006A.Channelstimulusrange.Stop/1e9;
    P5006A.RepCapIdentifier = 'Channel1';
    IFbw = P5006A.Channel.IF_Bandwidth;
    P5006A.RepCapIdentifier = 'Channel1';
    puntos = P5006A.Channel.Points;

    set(handles.fstart, 'String', fstart);
    set(handles.fstop, 'String', fstop);
    set(handles.points, 'String', puntos);
    set(handles.points, 'Value',puntos);
    set(handles.IFbw, 'String', [num2str(IFbw) ' Hz']);

    set(handles.text_freq_inicial, 'String', fstart);
    set(handles.text_freq_final, 'String', fstop);
    set(handles.text_num_puntos, 'String', puntos);
    set(handles.text_bwif, 'String', IFbw);

% Desconexion con el equipo
    disconnect(P5006A);
    delete(P5006A);

else % En caso de que no haya ningun calset preparado para ser seleccionado...
    set(handles.text_tipo_barrido, 'String', ''); % Se vacian en los correspondientes
    textos
    set(handles.text_freq_inicial, 'String', '');
    set(handles.text_freq_final, 'String', '');
    set(handles.text_num_puntos, 'String', '');
    set(handles.text_bwif, 'String', '');
end
```

REFERENCIAS

- [1] KEYSIGHT TECHNOLOGIES, «Keysight Instrument Drivers,» [En línea]. Available: <https://edadocs.software.keysight.com/kkbopen/keysight-instrument-drivers-588280372.html?jmpid=zzfinddrivers>.
- [2] MathWorks, «Instrument Control Toolbox,» [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/products/instrument.html>.